

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÖNDEN BAĞIMSIZ METAMALZEME SOĞURUCU

Kerim Gökhan YÜKSEL

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2019**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Kerim Gökhan YÜKSEL tarafından hazırlanan “Yönden Bağımsız Metamalzeme Soğurucu” adlı tez çalışması 06/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan : Doç. Dr. Halil BERBEROĞLU
Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Ş. Barış EMRE
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdür Vekili

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

06/09/2019



Kerim Gökhan YÜKSEL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÖNDEN BAĞIMSIZ METAMALZEME SOĞURUCU

Kerim Gökhan YÜKSEL

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Yüksek verimle elektromanyetik soğurma gerçekleştiren metamalzeme soğurucuların soğurma mekanizmaları irdelenmiş ve soğurma ile elektromanyetik dalga polarizasyonu ve geliş açısı arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonrasında günümüze kadar geliştirilen farklı soğurucu yapı ve soğurma özellikleri incelenerek yorumlanmıştır. Mevcut soğurucu yapılarından elde edilen bulgular ışığında yatay ve dikey eksende dört yönlü simetri özelliğine sahip birden fazla soğurucu yapısı önerilmiş ve önerilen yapıların numerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numerik analizlerden yola çıkılarak polarizasyon ve geliş açısı değerlerinden en az oranda etkilenen özgün bir yönden bağımsız soğurucu yapısı tasarlanmış ve benzetim yöntemi ile numerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen soğurucu yapısını özgünlüğü bilinen önceki araştırmalarda yer alan soğurucu yapılarına göre, değişen polarizasyon ve yüksek geliş açısı değerlerinde yüksek oranda soğurma elde edilmesi ve açığa bağlı frekans kayma oranının düşük olmasıdır. Yapılan numerik analizler sonucunda TE polarizasyonu altında 6.28 GHz frekans değerinde, 0° 'den 70° geliş açısına kadar %93'ün üzerinde, 60° geliş açısına kadar ise %98'in üzerinde sabit ve yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. TM polarizasyonu altında da aynı frekans değerinde 0° 'den 70° geliş açısına kadar %93'ün üzerinde, 60° geliş açısına kadar ise %96'nın üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. TE polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekansında %0,32 oranında bir kayma gözlenirken, TM polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekans değerinde %0,37 oranında kayma olduğu gözlenmiştir. Sonrasında soğurucu prototipinin üretimi fotolitografi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak, üretilen prototip soğurucunun deneysel ölçümleri gerçekleştirilerek elde edilen deneysel sonuçlar ile yapılan numerik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve numerik analiz sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçlarının birbiri ile iyi bir şekilde eşleştiği gözlenmiştir.

Eylül 2019, 69 sayfa

Anahtar Kelimeleri: Metamalzeme soğurucu, polarizasyon, dalga geliş açısı, elektromanyetik dalga, elektromanyetik soğurma

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

OMNIDIRECTIONAL METAMATERIAL ABSORBER

Kerim Gökhan YÜKSEL

Ankara Üniversitesi

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

The absorption mechanism of metamaterial absorbers with high electromagnetic absorption property were examined to determine the relation between absorption process and polarization angle and incident angle of electromagnetic wave. Then, the absorption reaction of the different absorber structures, which has been developed till today were examined and interpreted under different wave polarization and incident angles. In the light of these findings a novel omnidirectional metamaterial absorber which has fourfold symmetrical pattern were designed on, and numerical analysis were obtained from a commercial simulation program which uses finite integral technique. The novelty of the absorber structure lies in its high absorption ratio and low frequency shift property under different polarization and wide incident angles compared to wide angle absorbers reported before. Numerical analysis has shown that the absorber has resonant frequency at 6.28 GHz under TE polarization and the absorption ratio at this frequency is over 93% under incident angles from 0° to 70° and over 98% absorption under incident angles from 0° to 60° . Over 93% absorption ratio was obtained under TM polarization and incident angles from 0° to 70° and over 96% absorption was obtained under incident angles up to 60° at the same frequency band. It was observed that the resonant frequency of the absorber shifts 0.32% with the change of incident angle under TE polarization, and 0.37% under TM polarization. Finally, a prototype absorber structure was made by using photolithography technique. The experimental measurements were carried out and the simulation results were verified with the experimental results.

September 2019, 69 pages

Key Words: Metamaterial absorber, polarization, wave incident angle, electromagnetic wave, electromagnetic absorption

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Metamalzemeler ile tanışmamı sağlayıp, çalışmalarımda bana bilgi, tecrübe ve ilgisiyle yol gösteren ve ilerlememi sağlayan danışman hocam sayın Prof. Dr. Barış AKAOĞLU'na, bana her zaman destek olan aileme ve çalışmalarımda bana gerekli olan azmi ve ilhamı veren Infected Mushroom ailesine teşekkür ederim.

Kerim Gökhan YÜKSEL

Ankara, Eylül 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1.GİRİŞ	1
1.1 Rezone Tipte Elektromanyetik Dalga Soğurucuları.....	3
1.2 Tezin Amacı.....	7
2. METAMALZEMELER İLE ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURUMU...9	
2.1 Soğurma Mekanizmasının İncelenmesi.....	10
2.2 Elektromanyetik Dalga Soğurumunda Polarizasyonun Önemi.....	12
2.3 Elektromanyetik Dalga Soğurumunda Dalga Geliş Açısının Önemi.....	17
2.3.1 Geleneksel yaklaşım ile geniş açılı elektromanyetik soğurma.....	17
2.3.2 Yüksek empedans yüzeyi ile geniş açılı elektromanyetik soğurma.....	23
3. METAMALZEME ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURUCULARI.....	27
3.1 Yönden Bağımsız Metamalzeme Soğurucular.....	31
4. YÖNDEN BAĞIMSIZ METAMALZEME SOĞURUCU TASARIM.....	37
4.1 Yönden Bağımsız Metamalzeme Soğurucu Numerik Analizleri.....	48
5. ÜRETİM AŞAMASI VE DENEYSEL ÖLÇÜMLER.....	55
6. SONUÇ.....	64
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	69

SİMGELER DİZİNİ

ω	Açısal frekans
Θ	Azimutal açısı
δ	Dirac delta
ϵ	Elektriksel geçirgenlik katsayısı
σ	Elektriksel iletkenlik
Z	Empedans
L	İndüktans
T	İletim katsayısı
C	Kapasitans
n	Kırılma indisi
μ	Manyetik geçirgenlik katsayısı
S_{ij}	Saçılma parametresi
A	Soğurma katsayısı
R	Yansıma katsayısı
α	Yüzey açısı
Φ	Zenit açısı

Kısaltmalar

CNC	Bilgisayar numerik kontrolü
ERR	Elektriksel halka rezonatörü
TE	Enine elektrik alan
TM	Enine manyetik alan
<i>eff</i>	Etkin
GHz	Gigahertz
kHZ	Kilohertz
THz	Terahertz
S-parametreleri	Saçılma parametreleri
SRR	Yarıklı halka rezonatörü
<i>yüz</i>	Yüzey

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Yankısız oda testlerinde kullanılan rezonans olmayan soğuruculara bir örnek.....	2
Şekil 1.2 Salisbury ekranı patent görselleri.....	4
Şekil 1.3 Salisbury ekranı.....	5
Şekil 1.4 Çok katmanlı Jaumann soğurucusu yapısı.....	6
Şekil 2.1 Soğurucu hücre yapısı ve dalga ilerleme doğrultusu.....	9
Şekil 2.2 Tek boyutlu homojen, homojen olmayan tabaka için saçılma parametreleri....	12
Şekil 2.3 Ön, arka, dielektrik ara yüzey ile birleştirilmiş soğurucu hücre.....	13
Şekil 2.4 Landy vd. (2008) tarafından önerilen soğurucu yapısı.....	14
Şekil 2.5 Landy vd. (2008) tarafından önerilen soğurucuya ait değer grafikleri.....	16
Şekil 2.6 Tao vd. (2008) tarafından geliştirilen THz metamalzeme soğurucu yapısı.....	18
Şekil 2.7 TE (a) ve TM (b) ile farklı geliş açılarında soğurulma oranları.....	19
Şekil 2.8 Zhu vd. (2009) tarafından geliştirilen mikrodalga soğurucu yapısı.....	21
Şekil 2.9 Zhu vd. (2011) tarafından geliştirilen mikrodalga soğurucu yapısı.....	22
Şekil 2.10 Tretyakov ve Maslovski (2003) tarafından geliştirilen soğurucu yapısı.....	23
Şekil 2.11 TM ve TE ile farklı geliş açılarında yansıtma katsayısı oranları.....	26
Şekil 3.1 Padilla vd. (2006) tarafından incelenen metamalzeme birim hücre yapısı.....	28
Şekil 3.2 Luukkonen vd. (2009) tasarladığı soğurucu yapısının yansıtma değerleri.....	30
Şekil 3.3 Lee vd. (2016) tarafından geliştirilen soğurucunun soğurma yüzdeleri.....	33
Şekil 3.4 Lee vd. (2016) tarafından önerilen soğurucu yapısının benzetim ölçümleri.....	34
Şekil 3.5 Farklı α açısı değerlerinde tasarlanan yüzeylerin açılma hassasiyet değerleri.....	35
Şekil 3.6 Trung vd. (2016) tarafından geliştirilen soğurucunun soğurma oranları.....	36
Şekil 4.1 Tao vd. (2008) önerdiği THz frekans bandında çalışan soğurucu.....	37
Şekil 4.2 Tao vd. (2008) geliştirdiği soğurucu yapısının soğurma değerleri.....	39
Şekil 4.3 Tao vd. (2008) geliştirdiği soğurucu yapısının soğurma değerleri.....	40
Şekil 4.4 GHz mertebesinde modellenen birim hücre yapısının görünümü.....	42
Şekil 4.5 Modellenen birim hücre yapısının soğurma değerleri.....	43
Şekil 4.6 Tasarlanan farklı soğurucu yapılarına ait soğurma değerleri.....	46
Şekil 4.7 GHz mertebesinde tepki vermek üzere modellenen birim hücre yapısı.....	49
Şekil 4.8 Mevcut çalışmada geliştirilen soğurucu yapısının soğurma değerleri.....	50
Şekil 4.9 Mevcut çalışmada geliştirilen soğurucu yapısının soğurma değerleri.....	51
Şekil 4.10 TE ve TM modunda yapı üzerindeki yüzey akımları.....	53
Şekil 5.1 Periyodik soğurucu yapılarını içeren prototip kartın görünümü.....	55
Şekil 5.2 Pasif soğurucular ve horn antenleri içeren yarı yankısız oda görünümü.....	56
Şekil 5.3 Deneysel saçılma parametreleri için kullanılan network analizörü.....	57
Şekil 5.4 Yansıtma parametreleri ölçüm sisteminin kuruluş planı.....	58
Şekil 5.5 Üretilen yapının farklı polarizasyon açıları altında soğurma değerleri.....	59
Şekil 5.6 Üretilen yapının deneysel olarak ölçülen soğurma değerleri.....	60
Şekil 5.7 Üretilen yapının numerik ve deneysel ölçümlerinin kıyaslaması.....	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 802.11ac ve 802.11ax kablosuz iletişim protokollerine ait parametreler.....1



1. GİRİŞ

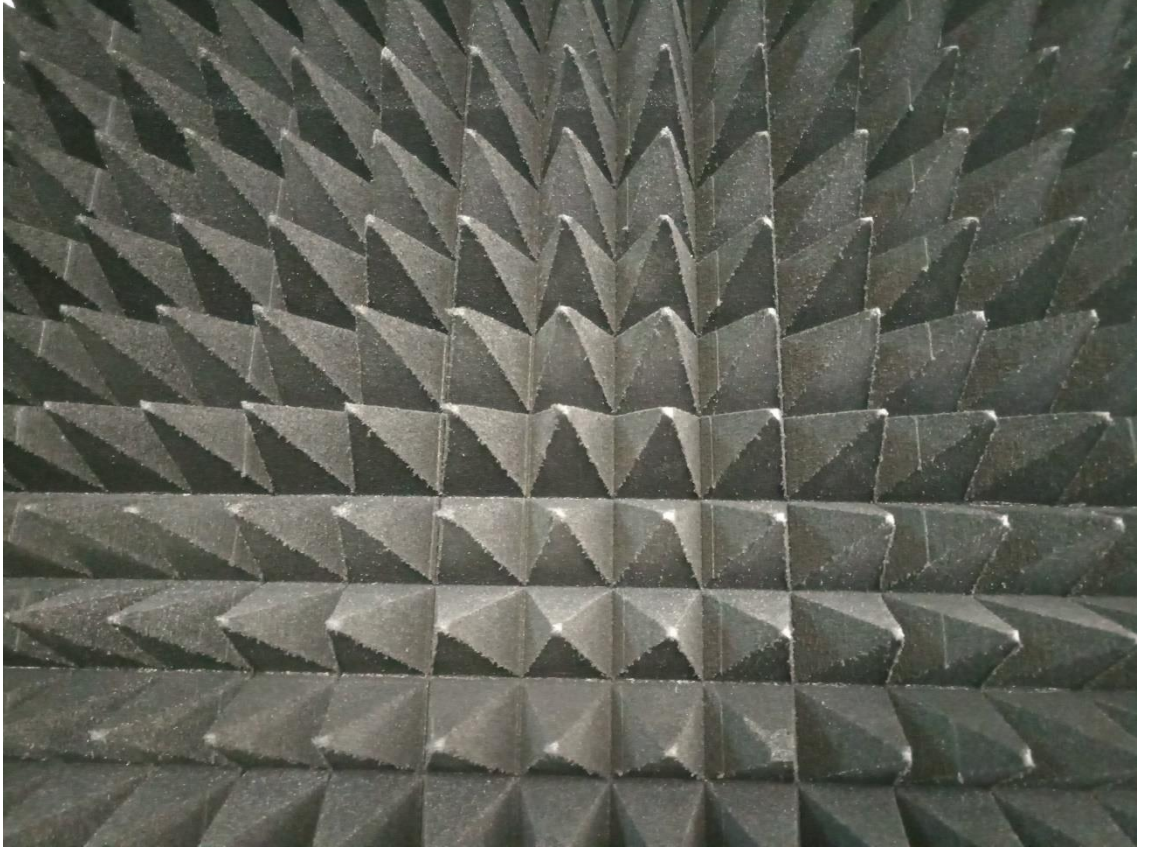
Kablosuz iletişim teknolojileri ve bu teknolojinin büyük bir parçası olan, IEEE 802.11a/b/g/n/ac ve benzer protokolleri kullanan Wi-Fi teknolojisi, günlük hayatımız içerisinde yoğun bir şekilde kullanılmakta ve hayatımızı büyük oranda kolaylaştırmaktadır. Cep telefonlarından bilgisayarlara, çeşitli görüntüleme cihazlarından mikrodalga fırınlara kadar birçok elektronik cihaz da elektromanyetik dalgaları kullanarak çalışmakta ve dünya genelinde kabul edilmiş olan 2.4 GHz veya 5 GHz frekans bandında çalışan kablosuz iletişim teknolojisini kullanmaktadır (Çizelge 1.1). Ancak günlük yaşantımızda kullandığımız bu elektronik cihazların sayısının günden güne artması sonucu söz konusu elektronik cihazlardan yayılan elektromanyetik dalgaların meydana getirdiği kirlilik tehlikesi günden güne artmakta ve insan sağlığını büyük oranda tehdit etmektedir (Gong vd. 2008). Ayrıca oluşan elektromanyetik kirlilik sonucu birbiri ile etkileşen sinyaller nedeniyle, Wi-Fi veya radyo frekans iletişim sinyallerinin olumsuz etkilenerek ağ iletişim hızının yavaşlanması ve ağ yoğunluğu gibi sorunlar oluşmaktadır. Bu sebeple, özellikle belirli iletişim frekansı değerlerinde çalışan soğurucuların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çizelge 1.1 802.11ac ve 802.11ax kablosuz iletişim protokollerine ait parametreler (Gong vd. 2008)

	802.11ac	802.11ax
Main Frequency Bands	5 GHz	2.4 GHz and 5 GHz
Channel Bandwidth (MHz)	20, 40, 80, 160, 80+80	Unlikely to change from 802.11ac
Number of spatial streams	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	Unlikely to change from 802.11ac
Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	Unlikely to change from 802.11ac
Maximum PHY Data rate	6933 Mbps (8SS, 160MHz, 256QAM, short guard interval)	Unlikely to change from 802.11ac
Advanced technologies	Downlink MU MIMO, Dynamic/static channel bandwidth operation with RTS/CTS	STR, Downlink and Uplink OFDMA, Uplink MU MIMO, Dynamic CCA

Elektromanyetik dalga soğurucular, belirli bir frekans değerinde üzerine gelen dalgaları soğuran ve teorik olarak ilgili frekans değerindeki tüm iletilen, yansıyan ve saçılan dalgaların yayılımının sifira indirgenmesini sağlayan cihazlar olarak tanımlanmaktadır. Elektromanyetik dalga soğurucuları genel olarak rezonans soğurucular ve rezonans olmayan,

geniş bant soğurucuları olarak iki grup altında toplanabilmektedir. Burada bahsedilen rezonans olmayan soğurucular, soğurucuyu oluşturan malzemenin fiziksel özelliklerinden yararlanmakta ve üzerine gelen ışığın frekans değerinden bağımsız olarak çalışarak geniş bantta soğurma gerçekleştirmektedir (Ruck vd. 1970).



Şekil 1.1 Yankısız oda testlerinde kullanılan rezonans olmayan soğuruculara bir örnek

Ancak rezonans olmayan soğurucuların hantal yapıları ve farklı kullanım alanları veya çalışma şekillerine göre soğurma mekanizmalarının ayarlanamaması nedeniyle kullanım alanları oldukça kısıtlı olmaktadır (Şekil 1.1). Rezonans soğurucular ise, belirli bir frekans değerinde üzerine gelen ışın ile etkileşime girerek rezonans oluşumu sağlayan soğurucu tipileridir. Bahsedilen belirli frekans değeri " ω_0 " şeklinde ifade edilmekte ve bu frekans değerine karşılık gelen dalga boyu ise, " c " ışık hızı cinsinden, $\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu noktada rezonans soğurucular, aralarında çalışma frekansına karşılık gelen dalgaboyunun çeyreği değerinde mesafeler olacak şekilde konumlandırılan çoklu katmanların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaları nedeniyle ve kullanılan

malzeme çeşidi ile geometrik özelliklerinin değiştirilebilmesi sonucunda hem kullanım alanı hem de kullanım şekilleri açısından oldukça farklı özelliklerde avantajlar sunmaktadır.

1.1 Rezone Tipte Elektromanyetik Dalga Soğurucuları

İletim hattı teorisinden yararlanılarak, rezone soğurucularda yer alan metal plakanın kısa devre gibi davrandığı ve bahsedilen metal plakanın, herhangi bir direnç tabakasının arkasına “ $\lambda_0/4$ ” değeri kadar bir mesafe ile konumlandırılması ile tüm yapının bir direnç tabakası üzerinde bir açık devre oluşturduğu söylenebilmektedir. Bu yapı özelliği sayesinde gelen dalganın sadece bahsedilen direnç tabakasının admitansı ile etkileşimde olması sağlanmakta ve yapının empedansının boş uzayın empedansına eşitlenmesi ile gelen dalgaya ait yansıma değerinin sıfıra indirgenmesi sağlanmaktadır. Yansıma değerinin sıfıra indirgenmesi sonucu oluşan kayıp ile gelen dalganın yüksek oranda soğurulması gerçekleştirilmektedir (Knott vd. 2004). Elektromanyetik soğurucuların geliştirilmesinde en büyük ilgi mikrodalga aralığında yer almakta ve bu soğurucuların mevcut radar performanslarını yükseltmek veya diğer radarlardan gizlenmeyi sağlamak amacıyla geliştirilmeye elverişli olmaları, özellikle savunma sanayinde kullanılmak üzere tercih edilmelerine neden olmaktadır (Emerson 1973). Elektromanyetik soğurucuların gelişimi ilk olarak W. W. Salisbury ve J. Jaumann’ın birbirlerinden habersiz olarak iki benzer cihazı üretmesi ile gerçekleşmiştir (Salisbury 1952). Bu cihazlardan biri olan Salisbury ekranı, rezone soğuruculara basit bir örnektir (Şekil 1.2).

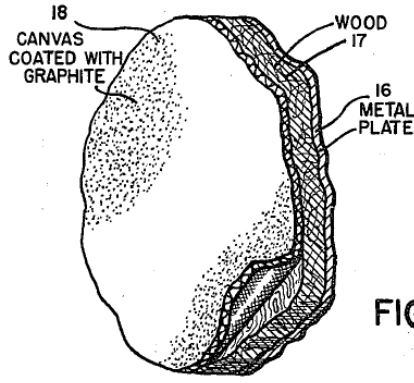


FIG. 2

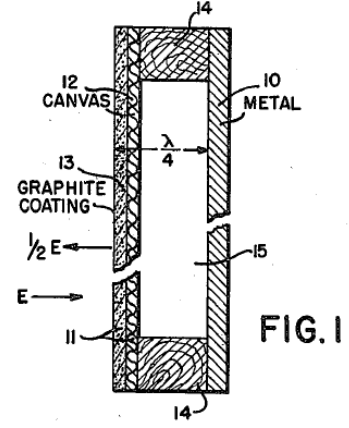


FIG. 1

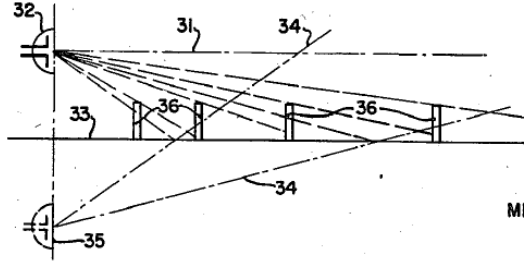


FIG. 5

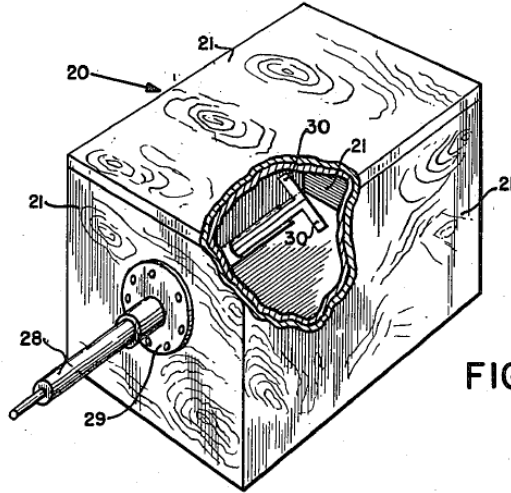


FIG. 3

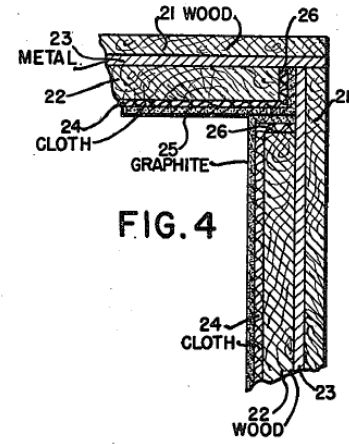


FIG. 4

INVENTOR
WINFIELD W. SALISBURY

BY

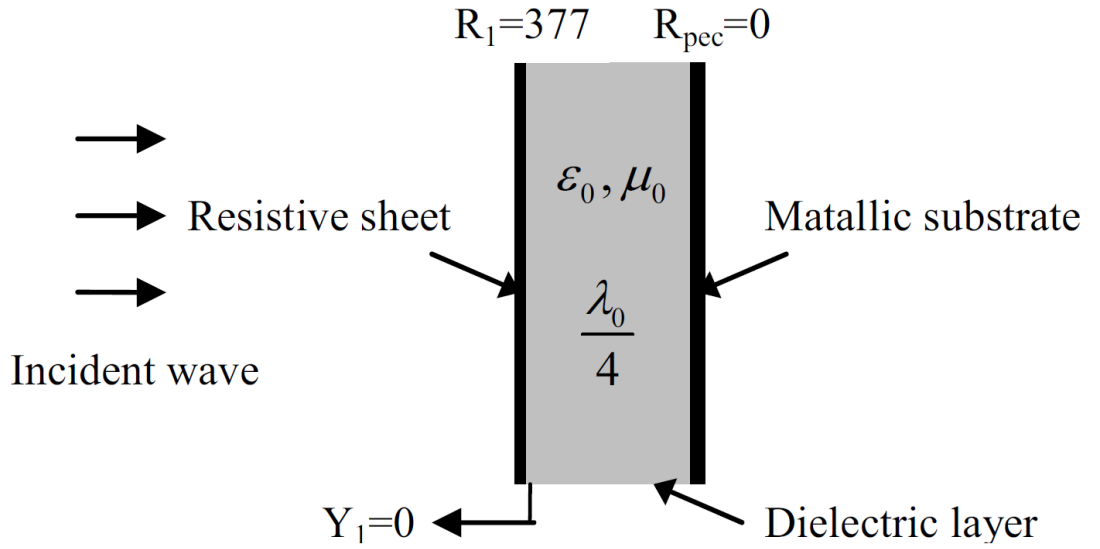
W. H. Hayes

ATTORNEY

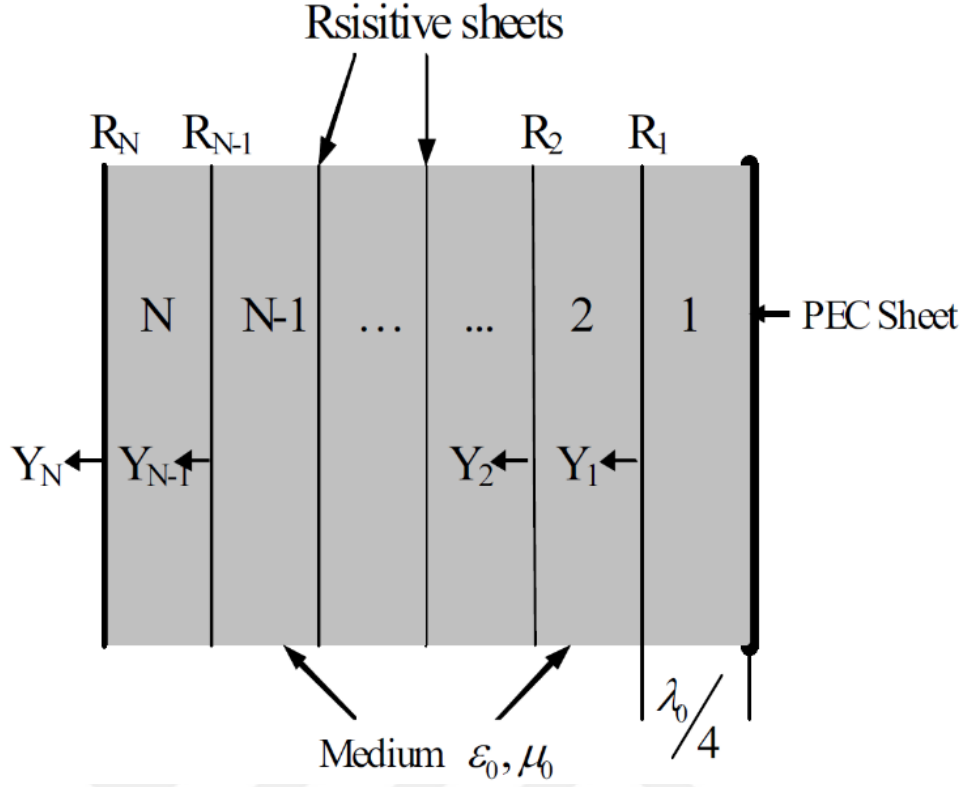
Şekil 1.2 Salisbury ekranı, "Absorbent body for electromagnetic waves" isimli patent görselleri (Salisbury 1952)

Bu cihazda, bir direnç tabakası metal bir tabakanın önüne, " $\lambda_0/4$ " değeri kadar bir aralık ile yerleştirilmekte ve iki tabaka, birbirlerinden kayıpsız bir dielektrik malzeme ile ayrılmaktadır (Ruck vd. 1970, Knott vd. 2004, Ke vd. 2011). Bu sayede oluşturulan açık devre, $R(\omega_0) = 0$ değerinin elde edilmesini sağlamaktadır (Şekil 1.3). Jaumann soğurucusu ise tek bir taban plakası önüne bir veya daha fazla direnç tabakası

yerleştirilmesi ile oluşturulmakta ve Salisbury ekranının gelişmiş bir versiyonu olarak kabul edilebilmektedir. Bu soğurucuda yer alan tüm tabakalar belli bir dalgaboyunda çalışacak şekilde dizayn edilmekte ve her bir tabaka arasında “ $\lambda/4$ ” değeri kadar mesafe yer almaktadır (Şekil 1.4). Bu sayede merkezi bir λ_0 değeri etrafında birden çok yansıma minimumu elde edilmektedir. Bu etki, cihazın birden çok dalgaboyu değerinde tepki veren bir rezonans soğurucu oluşturmakta ve geniş bantlı soğurma elde edilmektedir. Soğurma bant aralığı her yeni eklenen katman ile artmakta fakat bu durum kalın ve hantal bir soğurucu yapısının oluşmasına neden olmaktadır (Knott vd. 2004).



Şekil 1.3 Salisbury ekranı (Ke vd. 2011)



Şekil 1.4 Çok katmanlı Jaumann soğurucusu yapısı (Ke vd. 2011)

Son yıllarda ise hem dizayn hem de üretim aşamasında esneklik sağlamaları ve farklı malzeme ve tasarım yapısı kullanılarak farklı fiziksel etkilerin elde edilmesini sağlamaları nedeniyle “elektromanyetik metamateryaller” üzerine yapılan araştırmalar dünya genelinde büyük ilgi görmektedir (Jen vd. 2015). Metamateryallerin makroskopik parametrelerinin istenilen değerlerde ayarlanabilmesi ile dizayn ve üretim aşamasında elde edilen özgürlük sayesinde, negatif kırılma indisi (Liu vd. 2011, Jen vd. 2013), elektromanyetik geçirgenlik (Li vd. 2015), süper lens etkisi (Sun vd. 2015), mükemmel soğurucu (Aydın vd. 2011) ve görünmezlik pelerini (Landy ve Smith 2013) gibi birçok özgün fiziksel etkinin elde edilmesi sağlanmaktadır. Etkin ortam teorisine göre metamateryaller, karmaşık elektriksel geçirgenlik;

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$$

ve manyetik geçirgenlik;

$$\mu(\omega) = \mu_1 + i\mu_2$$

ile tanımlanabilmektedir. Metamalzemeler üzerine yapılan araştırmaların büyük bir bölümü, negatif kırılma indisinin elde edilmesi için $\epsilon(\omega)$ ve $\mu(\omega)$ değerlerinin gerçel kısımları olan ϵ_1 ve μ_1 değerlerine odaklanmaktadır. Ancak, $\epsilon(\omega)$ ve $\mu(\omega)$ değerlerinin enerji kaybını ifade eden ve imajiner bileşenleri olan ϵ_2 ve μ_2 değerleri ise dalga iletimi ve yansımaları minimuma indirgeyerek yüksek soğurma elde edilmesi gibi farklı fiziksel özelliklerin ve kullanım şekillerinin ortaya çıkarılmasına olanak vermektedir. Teorik olarak, metamalzeme birim hücre yapısına ait geometrik ölçülerin değiştirilmesi ile $\epsilon(\omega)$ ve $\mu(\omega)$ rezonansına bağlı merkezi açısız frekansın (ω_0) hassas bir şekilde ayarlanması sağlanmaktadır. Bu sayede, $\epsilon(\omega)$ ve $\mu(\omega)$ değerlerinin birbirine eşitlenmesi ve metamalzeme yapısına ait empedans değerinin boş uzayın empedans değerine eşitlenmesi;

$$z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\epsilon(\omega)} = 1$$

şeklinde sağlanarak metamalzeme yapısı üzerine gelen dalgaya ait olan elektrik ve manyetik alanların her ikisinin de soğurulması sağlanmaktadır (Avitzour vd. 2009). Landy vd. (2008) tarafından yılında ilk kez önerilen ve mükemmel metamalzeme soğurucu olarak anılan soğurucu yapısının ardından metamalzeme soğurucuların geliştirilmesine ve optimize edilmesine yönelik olarak farklı frekans aralıklarında (Khuyen vd. 2015) ve uygulama alanlarında (Yoo vd. 2014) çalışmaya uygun, çok sayıda çalışma gerçekteştirilmiştir. Ancak yaklaşık yüz yıl önce açıklanan Planck yasasına (Planck 1901) uygun özellikte; üzerine gelen tüm ışınları soğuran bir malzemenin elde edilmesi için frekans, polarizasyon ve geliş açısından bağımsız olarak soğurma gerçekteştiren bir yapının geliştirilmesine yönelik araştırmalar günümüzde de yoğun bir şekilde devam etmektedir.

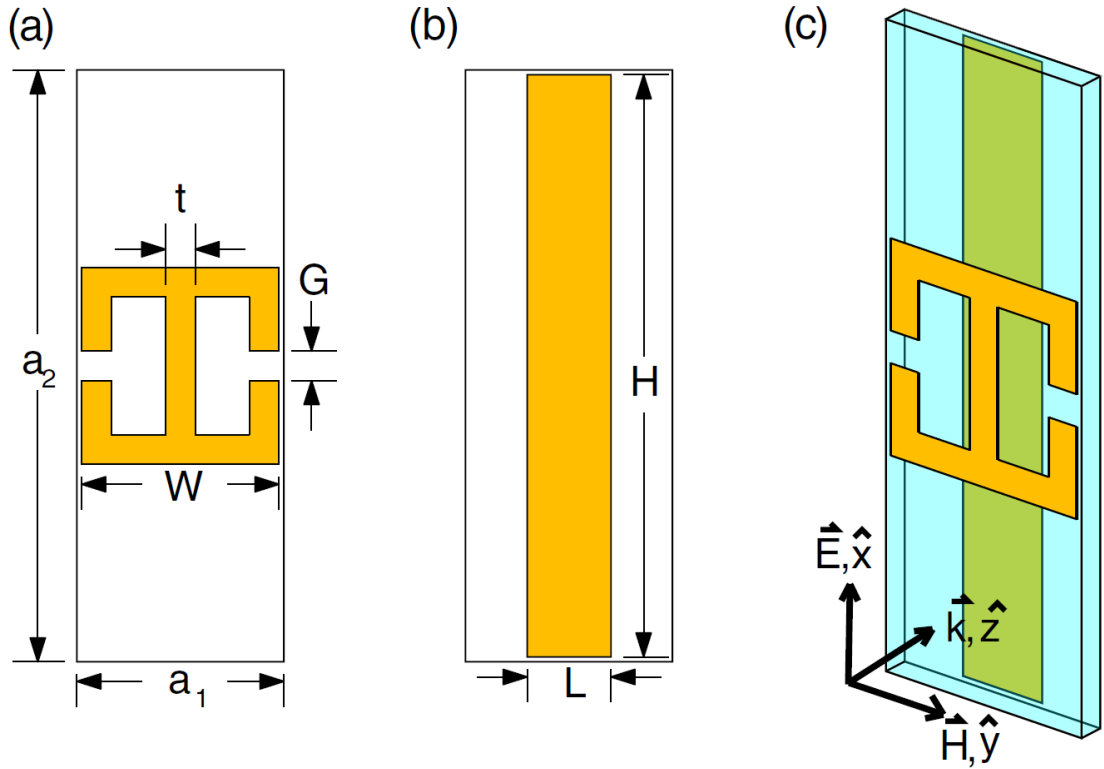
1.2 Tezin Amacı

Bu tezin ana amacı, mikrodalga aralığında çalışan, düşük yüzey alanı değerine sahip, üzerine gelen ışının polarizasyon ve geliş açısı değerinden bağımsız olarak yüksek oran soğurma gerçekteştiren bir metamalzeme yapısının geliştirilmesi ve üretilerek soğurma veriminin deneysel olarak ölçülmesidir. Genel olarak bu tez çalışması aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- Elektriksel olarak küçük boyutlu rezonatör kullanarak elektromanyetik dalganın soğurulmasının analiz edilmesi ve kanıtlanması.
- Eş malzemeler ile oluşturulan, iletken yol uzunlukları birbirinden farklı olan metamalzeme birim hücrelerinin soğurma verimlerinin benzetim tekniği ile belirlenmesi ve kıyaslanması.
- Benzetim ölçümleri sonrasında seçilen en uygun yapıya sahip metamalzeme birim hücrelerinin geliştirilerek elde edilen birim hücrenin farklı polarizasyon ve geliş açısına sahip ışınım altındaki soğurma değerlerinin yine benzetim tekniği ile belirlenmesi ve sonuçların incelenmesi.
- Geliştirilen metamalzeme birim hücresi yapısından oluşan bir periyodik yüzeyin üretilmesi ve üretilen yüzeyin farklı polarizasyon ve geliş açısına sahip ışınımlar altındaki soğurma değerlerinin deneysel olarak elde edilmesi ve elde edilen sonuçların benzetim sonuçları ile karşılaştırılması.

2. METAMALZEMELER İLE ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURUMU

İlk olarak Landy vd. (2008) tarafından geliştirilen ve 11.5 GHz frekans değerinde, benzetim yolu ile %96; deneysel olarak ise %88 oranında soğurma gerçekleştirebilen metamalzeme soğurucu yapısı, yapısal olarak birden fazla dalgaboyundan küçük ölçülere sahip birim hücreden oluşmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Landy vd. (2008) tarafından geliştirilen (a) elektriksel rezonatör yapısı, (b) kesik iletken tel, (c) dielektrik ara tabaka ile biçimlendirilen soğurucu hücre yapısı ve dalga ilerleme doğrultusu

Bu yapıdaki her bir birim hücre, elektriksel halka rezonatör (ERR), dielektrik altaş ve metal kesik telden meydana gelmektedir. Yapıya ait olan altaşın, elektriksel halka rezonatörün ve metal kesik telin geometrik ölçülerinin değiştirilmesiyle, soğurucunun manyetik ve elektriksel tepkisine karşılık gelen etkin manyetik geçirgenlik μ_{eff} ve etkin elektriksel geçirgenlik ϵ_{eff} değerlerinin değiştirilmesi sağlanmaktadır. Landy vd. (2008) tarafından önerilen bu metamalzeme soğurucu yapısından sonra metamalzeme tabanlı

birçok soğurucu dizaynı önerilmiştir. Bunlar arasında, kompakt ve ultra-ince soğurucular (Sharma vd. 2017), çok bantlı ve geniş bantlı soğurucular (Baskey vd. 2015), polarizasyon hassasiyetsiz (Wang vd. 2014) soğurucular yer almaktadır.

2.1 Soğurma Mekanizmasının İncelenmesi

Etkin ortam teorisine göre bir metalmalzeme soğurucunun soğurma mekanizması, tüm soğurucu yapısının elektriksel geçirgenlik $\varepsilon(\omega)$ ve manyetik geçirgenlik $\mu(\omega)$ değerlerine ait karmaşık parametrelere bağlı bulunmaktadır (Liu vd. 2007). Bir elektromanyetik soğurucu ile soğurulan enerjinin genellikle düşük olması nedeniyle soğurucunun soğurma verimi önem arz etmekte (Ostaffe 2012) ve soğurma değeri, yansımaya ve iletim değerlerinin çıkarılması ile aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$$

Buradaki $A(\omega)$ soğurma değerini; $R(\omega) = |S_{11}(\omega)|^2$, saçılma parametreleri cinsinden yansımaya değerini; $T(\omega) = |S_{21}(\omega)|^2$, saçılma parametreleri cinsinden iletim değerini ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitlikten de anlaşılacağı gibi soğurucu yapısının optimize edilerek soğurma katsayısı $A(\omega)$ 'nin en yüksek değere çıkarılabilmesi için yansımaya katsayısı $R(\omega)$ değeri ve iletim katsayısının $T(\omega)$ değerinin minimuma indirgenmesi gerekmektedir. Uygulamada hem yansımaya katsayısının hem de iletim katsayısını sıfıra indirgenmesi oldukça zor olmaktadır. Ancak, yapısı üzerinde mükemmel elektriksel iletken (PEC) bulduran bir soğurucunun yüzey ışın girişim derinliği, mükemmel elektriksel iletken tabakanın kalınlığından düşük olmaktadır. Bu sayede, dalgaın ilerlemesi engellenerek gelen ışının iletim değeri $T(\omega)$ 'nin sıfıra oldukça yakın bir değere kadar indirgenmesi sağlanabilmektedir. Soğurucu yapısının toplam empedans değerinin, soğurucunun bulunduğu ortama ait olan empedans değerine eşitlenmesi ise yansımaya değeri $R(\omega)$ 'nin sıfıra yaklaştırılmasını sağlamaktadır. Elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine ait gerçel ve imajiner parametrelerin birbirinden bağımsız olarak ayarlanmaları sayesinde $\varepsilon(\omega) \approx \mu(\omega)$ olacak şekilde ayarlanarak soğurucu yapısının çalışma frekansındaki empedans değerinin, boş uzayın empedans değerine eşit olması sağlanmaktadır. Soğurma yapısının çalışma frekansındaki empedans

değeri ve kırılma indisi, yansıyan ve iletilen dalgaların saçılma parametreleri üzerinden aşağıdaki gibi elde edilebilmektedir:

$$z(\omega) = \sqrt{\frac{(1+S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}{(1-S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}}$$

ve

$$n(\omega) = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2(\omega) + S_{21}^2(\omega)) \right]$$

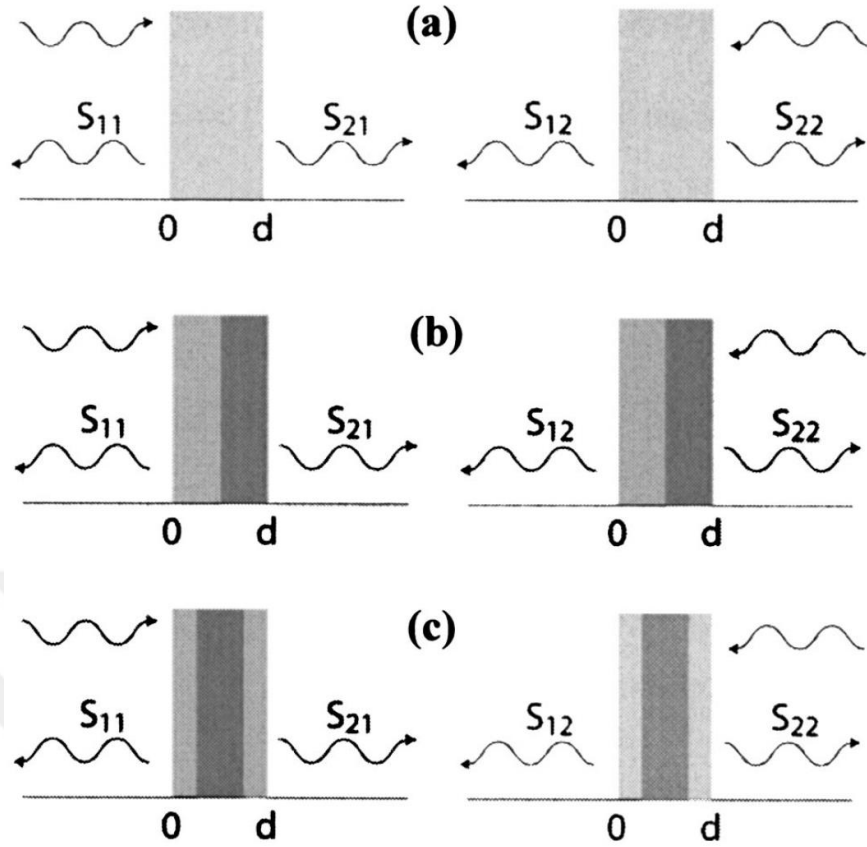
Burada “ d ” tek bir soğurucu birim hücrelerine ait kalınlığı temsil ederken; $kd = 2\pi d/\lambda$ ile ifade edilmektedir. Empedans ve kırılma indisi aynı zamanda elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğe bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{n(\omega)}{z(\omega)}$$

ve

$$\mu(\omega) = n(\omega)z(\omega)$$

Şekil 2.2’de gösterilen yansıyan dalgalara ait saçılma parametreleri olan $S_{11}(\omega)$ ve iletilen dalgalara ait saçılma parametreleri olan $S_{21}(\omega)$ değerleri numerik benzetim yazılımları ile hesaplanabilmekte ve deneysel olarak ölçülebilmektedir.

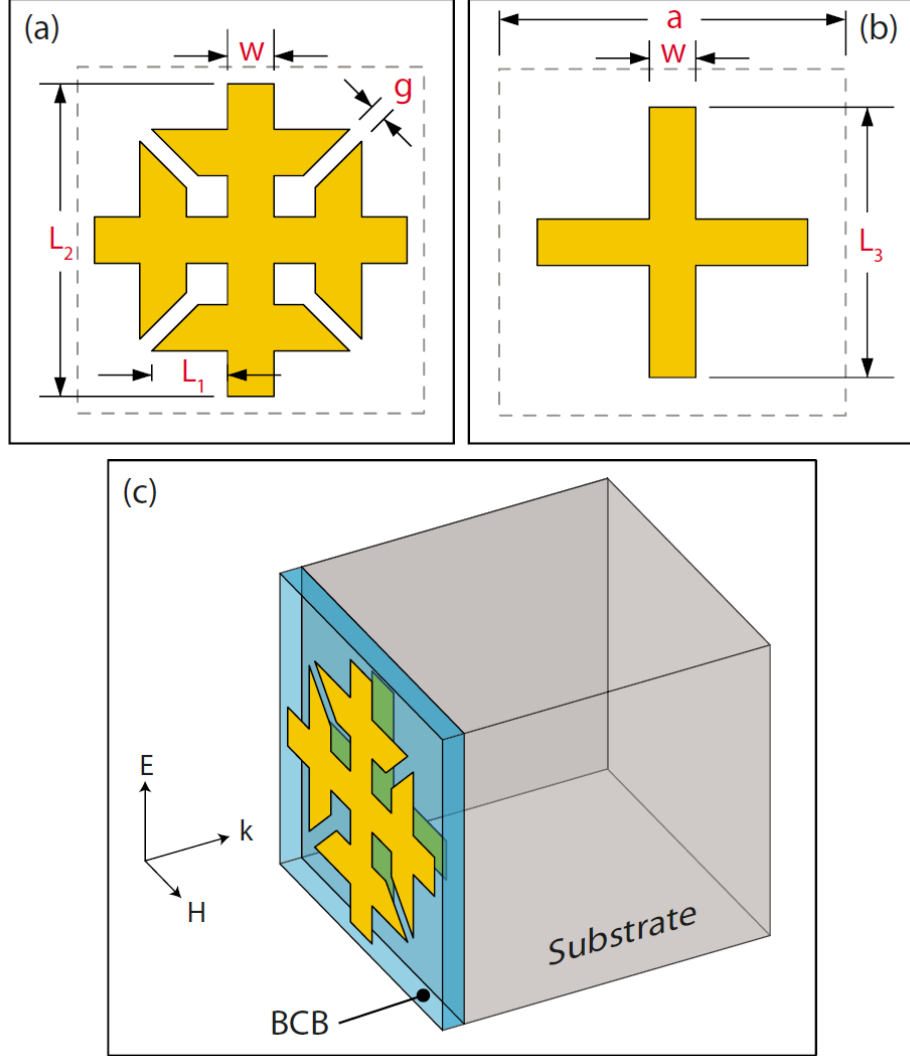


Şekil 2.2 Tek boyutlu homojen tabaka (a), homojen olmayan asimetric tabaka (b), homojen olmayan simetrik tabaka (c) için saçılma parametrelerinin gösterimi (Smith vd. 2005)

2.2 Elektromanyetik Dalga Soğurumunda Polarizasyonun Önemi

Polarizasyon hassasiyetli olan soğurucular, üzerine gelen ışık dalgasının sadece belli bir polarizasyon durumunda verimli bir soğurma işlemi gerçekleştirebilmektedir. Ancak soğurucuların fiziksel olarak kullanıldığı pratik uygulamalarda gelen ışık dalgasının sadece belli bir polarizasyon durumunda bulunması mümkün olamamakta ve bu durum polarizasyon hassasiyetli soğurucuların reel kullanım alanlarını oldukça kısıtlamaktadır. Bu sebeple, teorik ve uygulamalı olarak gelen dalganın polarizasyon durumundan bağımsız olarak soğurma gerçekleştirebilen soğurucuların geliştirilmesi ihtiyaç duyulmaktadır.

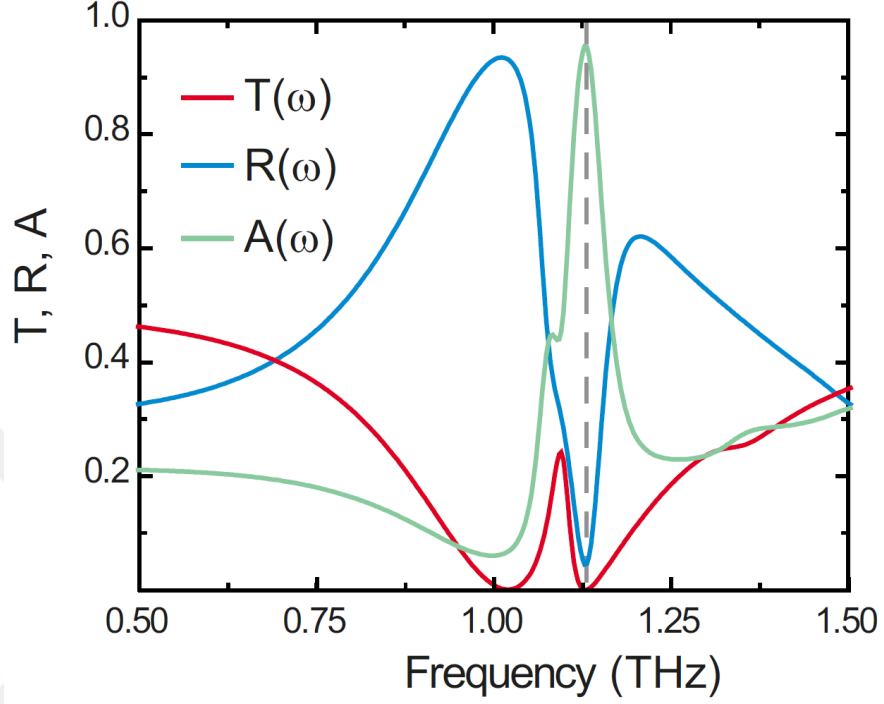
Landy vd. (2009) tarafından geliştirilen ilk simetrik metamalzeme soğurucu yapısı, teorik ve deneysel olarak yüzey normali üzerinde gelen dalganın polarizasyondan bağımsız olarak soğurulmasını sağlamaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Ön yüzey, elektriksel halka rezonatörü yapısı (a); arka yüzey, iletken haç yapısı (b); dielektrik ara yüzey tabakası ve alttaş ile birleştirilmiş soğurucu hücre yapısı (c). Eksen, dalga geliş yönünü belirtmektedir. Boyutlar: $a=84 \mu\text{m}$, $L_1=52.5 \mu\text{m}$, $L_2=74 \mu\text{m}$, $L_3=64 \mu\text{m}$, $w=11 \mu\text{m}$ ve $g=4 \mu\text{m}$ (Landy vd. 2009)

Bu yapıda etkin ortam modelinden yararlanılarak metamalzeme soğurucunun etkin elektriksel ve manyetik geçirgenliğine ait olan gerçel ve imajiner parametrelerin

birbirinden bağımsız olarak değiştirilmesi sağlanmakta ve bu sayede yüksek oranda soğurma elde edilmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Landy vd. (2009) tarafından önerilen soğurucu yapısının, benzetim yolu ile hesaplanan yansımaya, iletim ve soğurma değerlerinin değişimini gösteren grafikler

Karmaşık iletim katsayısı $t(\omega)$ ve karmaşık yansımaya katsayısı $r(\omega)$ cinsinden soğurma katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$A = 1 - |r(\omega)|^2 - |t(\omega)|^2$$

Karmaşık yansımaya ve iletim katsayılarının, bir d uzunluğu için karmaşık kırılma indisi $n = n_1 + in_2$ ve karmaşık empedans $Z = Z_1 + iZ_2$ parametrelerine bağlı ifadesi ise aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$r(\omega) = -\frac{i}{2} \left(Z - \frac{1}{Z} \right) \sin(nkd) t(\omega)$$

$$t(\omega)^{-1} = \left\{ \sin(nkd) - \frac{i}{2} \left(Z + \frac{1}{Z} \right) \cos(nkd) \right\} e^{ikd}$$

Buradaki “ $k = \omega/c$ ” dalga sayısı ve “ c ” vakum ortamındaki ışık hızıdır. Empedans değerinin boş uzayın empedansına eşitlenmesi ($Z = 1$) durumunda iletim katsayısı aşağıdaki formu almaktadır:

$$t(\omega)^{-1} = \{\sin(nkd) - i\cos(nkd)\}e^{ikd} = e^{-i(n_1-1)kd}e^{n_2kd}$$

$$T = |t|^2 = e^{-2n_2kd}$$

Böylece n_2 değerinin sonsuza ıraksaması ile $T = 0$ olmaktadır. Böylece iletim ve yansıma katsayılarının sıfıra indirgenmesi ($T = R = 0$) ile soğurma katsayısı en yüksek değere ($A = 1$) ulaşmaktadır.

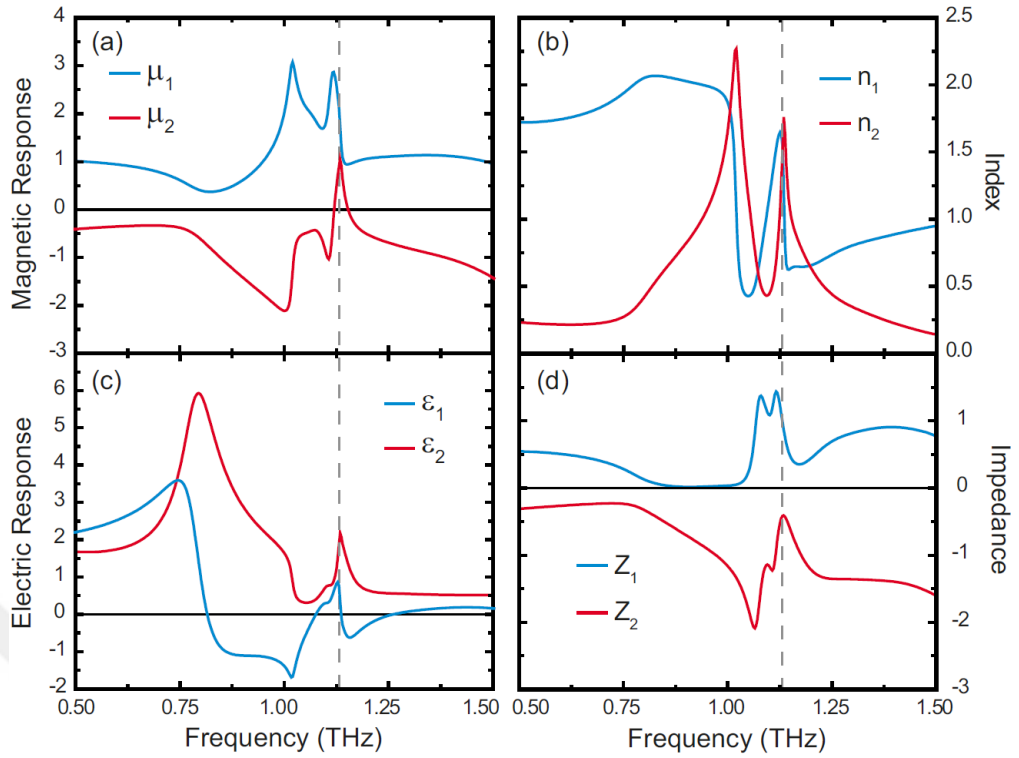
Kısaca bu durum, yüksek soğurma elde edilmesi için n_2 değerinin yüksek olması halinde, $Z = 1$ olması gerektiğini göstermektedir.

Böylece çalışma frekansına bağlı karmaşık elektriksel geçirgenlik $\varepsilon(\omega)$ ve karmaşık manyetik geçirgenlik $\mu(\omega)$ değerlerinin hassas bir şekilde ayarlanması için metamalzeme soğurucu yapısının dizaynı ve yapının geometrik parametreleri önem kazanmaktadır.

Metamalzeme soğurucunun rezonans mekanizması, çalışma frekansı değerindeki karmaşık salıncı eşitliği ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\varepsilon(\omega), \mu(\omega) = \varepsilon_\infty, \mu_\infty + \frac{F_{\varepsilon, \mu} \omega^2}{\omega_{0\varepsilon, \mu}^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}$$

Buradaki “ F ” değeri salıncı gücünü; “ γ ” değeri sönüm katsayısını; “ ω_0 ” değeri salıncının merkez frekansını; “ ε, μ ” değerleri yüksek frekans katkısını ifade etmektedir. Landy vd. (2009) tarafından önerilen metamalzeme soğurucu hücrenin yüzey normal eksenine etrafındaki dört yönlü rotasyonel simetrik geometrisi sayesinde polarizasyondan bağımsız olarak soğurma gerçekleştirebilen bir soğurucu yapısı elde edilmektedir. Bahsedilen metamalzeme soğurucu üzerinde yer alan kuplajlı halka rezonatör, elektriksel tepkiyi kontrol etmekte ve manyetik tepki kontrolü ise benzosiklobütan tabaka ile birbirlerinden ayrılan kuplajlı halka rezonatörü ile çapraz metal şerit yapısı arasındaki eşleşim ile gerçekleşmektedir.



Şekil 2.5 Landy vd. (2009) tarafından önerilen soğurucu yapısına ait manyetik geçirgenlik (a), kırılma indisi (b), elektriksel geçirgenlik (c), empedans (d) değerlerinin gerçel ve imajiner değer grafikleri

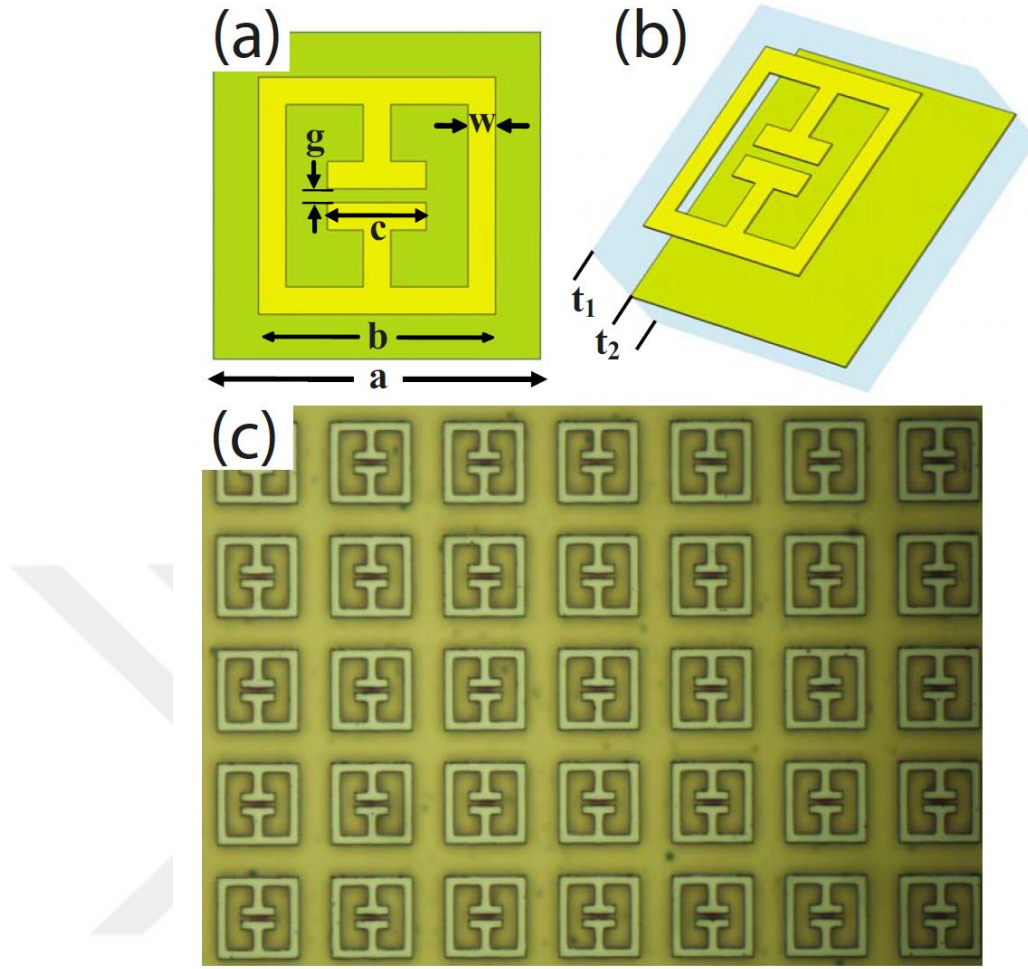
Şekil 2.5'te bu soğurucu yapısına ait elde edilen elektriksel ve manyetik tepkilere ait grafikler ile ϵ ve μ değerlerine ait imajiner ve gerçel değerler verilmektedir. Burada yaklaşık $\omega = 800$ GHz değerinde görülen ϵ_2 tepkisi söz konusu elektriksel halka rezonatör yapısına ait indüktif ve kapasitif rezonanstan ileri gelmektedir. İkinci elektriksel rezonans ise çapraz metal şerit etkisi ile 1.125 THz değerinde gerçekleşmektedir. Kırılma indisi ve empedans hesaplamalarına ait grafiklerden görüldüğü gibi, n_2 imajiner değerinin 1.75'e kadar pik yapması iletim değerinin sıfırlandığını göstermektedir. 1.13 THz frekans değerinde ise gerçel empedans $Z_1 = 1$ ve karmaşık empedans Z_2 değeri minimum iken yansıma değeri $R = 0$ olmaktadır. Bu değerler soğurucu yapısının 1.13 THz değerinde %95'e yakın bir verim ile soğurma gerçekleştirdiğini göstermektedir.

2.3 Elektromanyetik Dalga Soğurumunda Dalga Geliş Açısının Önemi

Kızılötesi, terahertz ve mikrodalga frekans aralığında, geniş geliş açısıyla soğurma gerçekleştirebilen metamalzeme soğurucu yapısının elde edilmesi amacıyla günümüze kadar birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Soğurucu yüzeyi üzerine gelen dalgaya ait geliş açısı değerinin artması ile soğurucunun soğurma verimi düzenli olarak azalmaktadır. Bunun nedeni geliş açısının artmasıyla birlikte empedans eşitleme koşullarının değişmesi ve empedans eşitsizliği nedeniyle soğurucu yapısının üzerine gelen ışını yansıtmaya başlamasıdır. Geniş geliş açısı aralığı ile soğurma gerçekleştiren metamalzeme soğurucular, yapısal modelleme açısından iki gruba ayrılabilir.

2.3.1 Geleneksel yaklaşım ile geniş açılı elektromanyetik soğurma

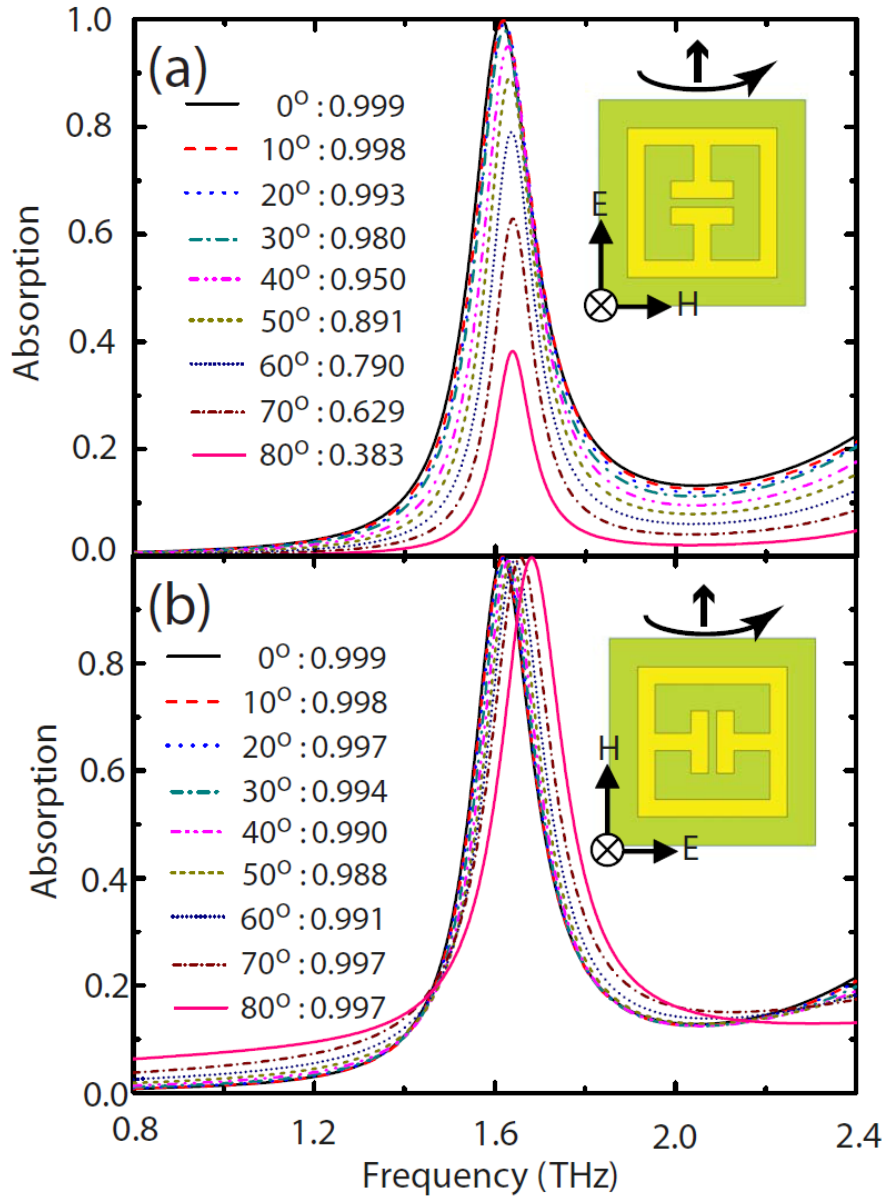
Metamalzeme soğuruculara ilk örneğin geliştirilmesinden sonra geniş açılı metamalzeme soğurucu için ilk hesaplamalar ve deneysel sonuçlar Tao vd. (2008) tarafından elde edilmiştir. Söz konusu çalışmada THz frekans aralığında, TM polarizasyonunda ve 80° 'den düşük geliş açılarında %99'un üzerinde; TE polarizasyonunda ve 50° 'ye kadar olan geliş açılarında %90'ın üzerinde soğurma elde edilmektedir.



Şekil 2.6 Tao vd. (2008) tarafından geliştirilen THz metamalzeme soğurucu yapısı. Boyutlar: $a=36 \mu\text{m}$, $b=25.9 \mu\text{m}$, $c=10.8 \mu\text{m}$, $g=1.4 \mu\text{m}$, $w=3 \mu\text{m}$, t_1 ve $t_2=8 \mu\text{m}$

Söz konusu çalışmada yer alan metamalzeme soğurucunun birim hücre yapısı, bir dielektrik tabaka ile birbirinden ayrılan iki metalik tabaka ve tüm yapıyı arkadan destekleyen ikinci bir dielektrik tabakadan meydana gelmektedir (Şekil 2.6). Yapının ön yüzeyinde yer alan yarıklı halka rezonatör, elektriksel geçirgenlik $\epsilon(\omega)$ değerinin kontrol edilmesini sağlarken, ara dielektrik tabakanın arka yüzeyinde yer alan ve yüzey alanının tamamını kaplayan metalik levha ise yarıklı halka rezonatörü ile arasında döngüsel akımların oluşmasını sağlamaktadır. Oluşan bu döngüsel akımlar sayesinde manyetik geçirgenlik $\mu(\omega)$ değerinin kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Bahsedilen ön tabaka, bakır malzemeden oluşan, ara dielektrik tabaka yüzeyinden 200nm kadar yükselen, $w = 3 \mu\text{m}$ kalınlığında ve $b = 25.9 \mu\text{m}$ kenar uzunluğuna sahip olan kare halka ve bahsedilen halka merkezinde yer alan, $c = 10.8 \mu\text{m}$ genişliğinde ve $g = 1.4 \mu\text{m}$ kadar bir açıklığa sahip olan

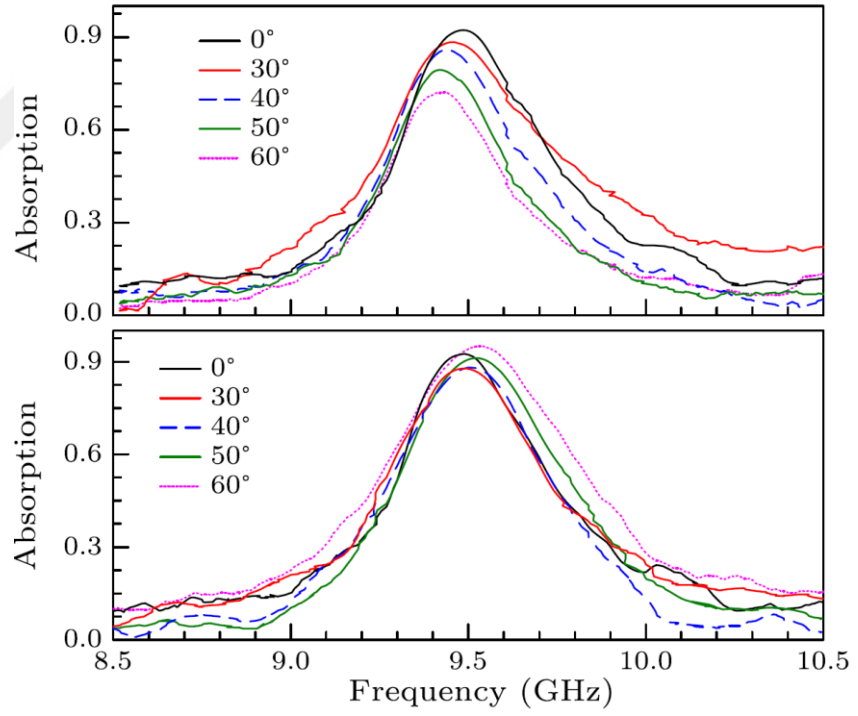
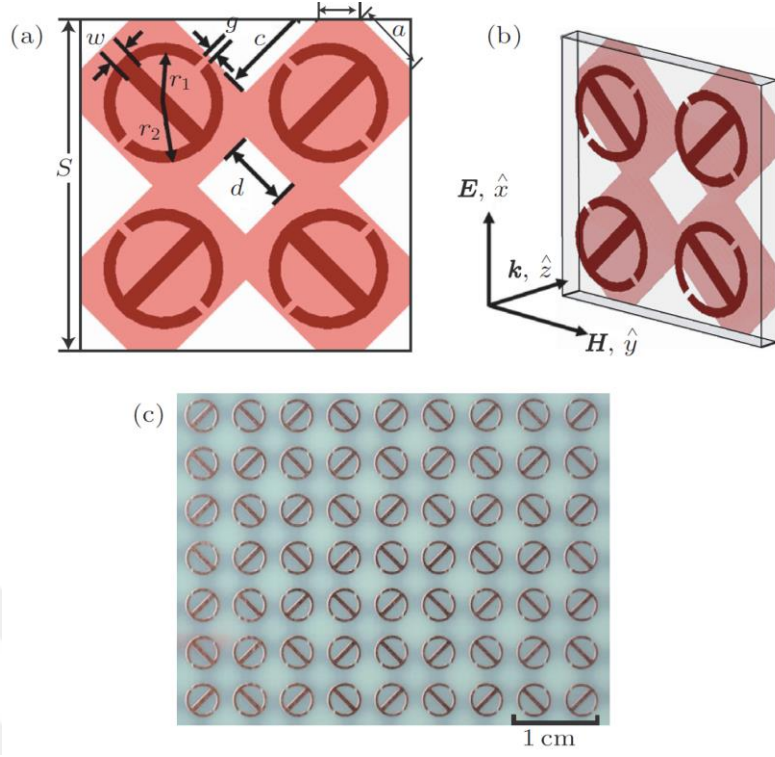
kapasitörden yapısından oluşmaktadır. Birim hücre kenar uzunluğu $a = 36 \mu\text{m}$ ve dielektrik kalınlıkları $t_1 = t_2 = 8\mu\text{m}$ olmakta ve dielektrik tabakaları, frekanstan bağımsız elektriksel geçirgenliği $\epsilon = 2.88+0.09i$ değerindeki esnek polimit malzemeden mamul olmaktadır. Polimit malzemenin esnek yapısı sayesinde, geliştirilen soğurucu eğimli bir yüzeyi kaplayacak bir şekilde konumlandırılabilir.



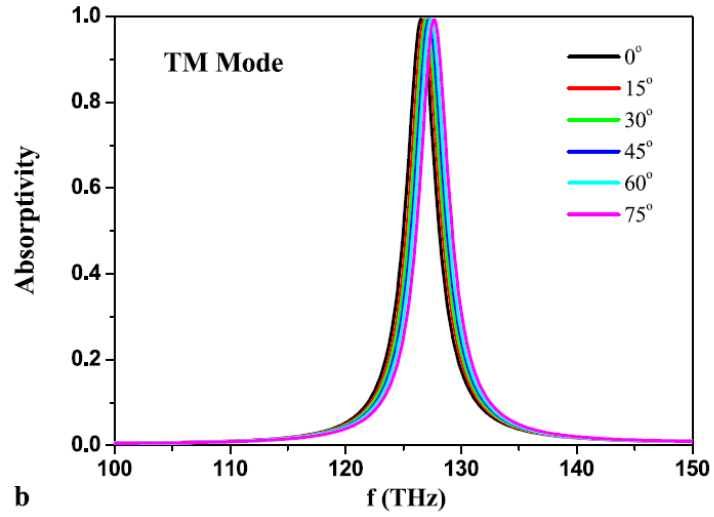
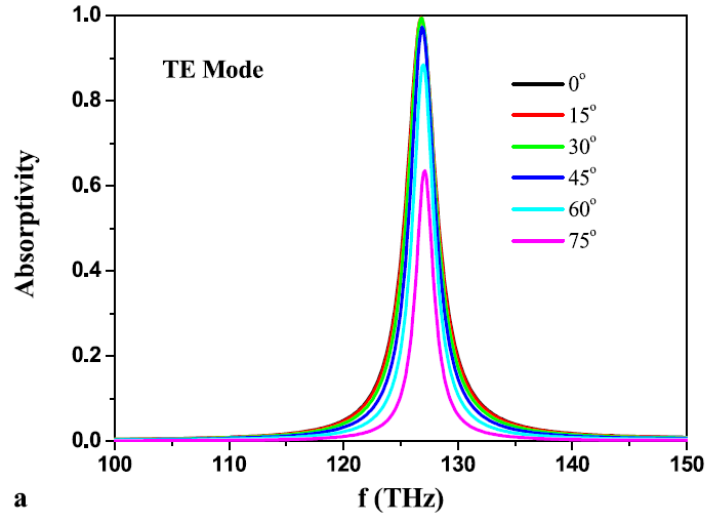
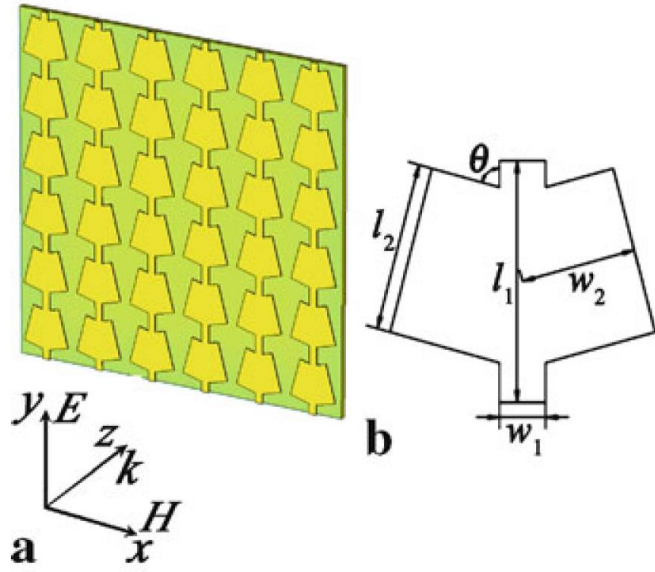
Şekil 2.7 TE (a) ve TM (b) polarizasyonu ile farklı geliş açılarında gönderilen elektromanyetik dalganın yapı tarafından soğurulma oranları (Tao vd. 2008)

Geliştirilen bu metamalzeme soğurucu 1.6 THz frekans değerinde %99.9 oranında soğurma gerçekleştirebilmektedir. TE polarizasyonunda değişen geliş açısı değeri ile soğurma verimi azalmakta ancak 50° 'nin altındaki geliş açısı değerlerinde %89'un üzerinde verim elde edilebilmekte ve maksimum soğurma piki yaklaşık 30 GHz kadar kaymaktadır. Bununla birlikte, TM polarizasyonunda ise 80° 'ye kadar olan geliş açılarında soğurma verimi %99'un üzerinde kalmaktadır (Şekil 2.7).

Tao vd. (2008) tarafından geliştirilen soğurucu yapısının tepkisine benzer şekilde literatürde yer alan birçok çalışmada TE polarizasyon moduyla gelen ışının soğurma verimi, geliş açısının değişmesiyle belirgin bir şekilde azalmaktadır (Şekil 2.8-2.9). Ancak, TM polarizasyon moduyla gelen ışınlar da geliş açısı değişimi ile çok az bir azalma görülmektedir (Zhu vd. 2009, Zhu vd. 2011).



Şekil 2.8 Zhu vd. (2009) tarafından geliştirilen mikrodalga soğurucu yapısı ve TE / TM polarizasyonu ile farklı geliş açıları altında soğurma verimi

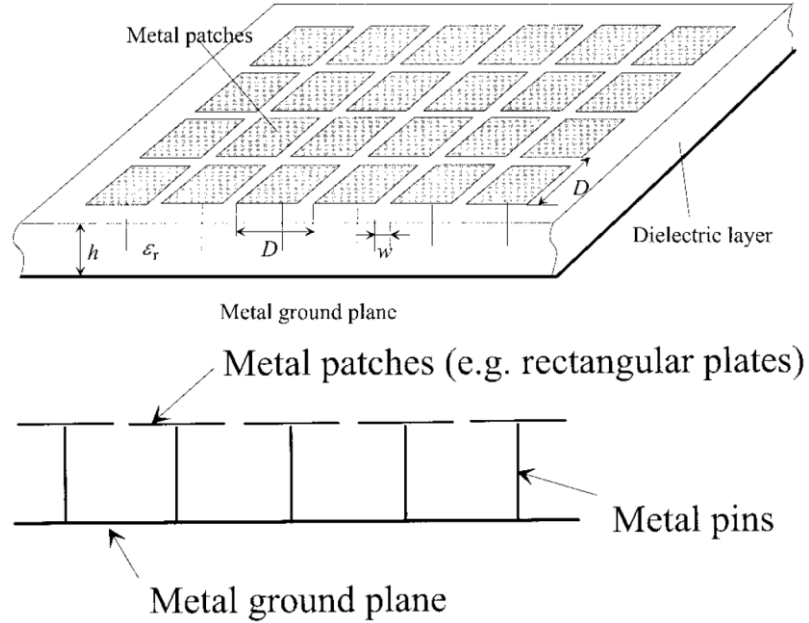


Şekil 2.9 Zhu vd. (2011) tarafından geliştirilen mikrodalga soğurucu yapısı ve TE / TM polarizasyonu ile farklı geliş açıları altında soğurma verimi

TM polarizasyonu ile gönderilen dalganın farklı geliş açıları altında bile yüksek verimle soğurulmasının nedeni, metalmalzeme soğurucu birim hücresine ait ön ve arka metalik katmanlar arasında oluşan döngüsel akımlar sayesinde manyetik alanın verimli bir şekilde kontrol edilerek farklı geliş açılarında gelen ışının etkin bir şekilde soğurulabilmesidir. Söz konusu çalışmada yer alan metalmalzeme soğurucuda, yapının özel dizaynı sayesinde, soğurma işlemi manyetik etki yanında yüzey üzerinde oluşan elektriksel etkiye de dayanmakta ve böylece TE polarizasyonunda da geniş geliş açılarında soğurma sağlayan bir yapı elde edilmektedir.

2.3.2 Yüksek empedans yüzeyi ile geniş açılı elektromanyetik soğurma

Soğurma veriminin artırılarak farklı geliş açılarında etkin soğurma sağlayan bir metalmalzeme soğurucunun geliştirilebilmesi için gelen ışının polarizasyonu ile soğurma arasındaki ilişkinin incelenmesi gerekmektedir. Tretyakov ve Maslovski (2003) tarafından yapılan araştırmada yüksek empedans yüzeyli bir yapı incelenmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Tretyakov ve Maslovski (2003) tarafından geliştirilen soğurucu yapısı

Söz konusu soğurucu yapısında, metal yama yüzeylerinin dizilim periyodu yapının çalışma dalgaboyundan oldukça düşüktür. Kare şeklindeki metal yamalar ve arka metalik tabaka birbirlerinden dielektrik tabaka ile ayrılmaktadır ve her bir metal yama ile arka metalik tabaka arasında birer iletken bağlantı hattı yer almaktadır. Teorik olarak yüzey empedansı $Z_{yüz}$, dielektrik tabaka empedansı Z_d ve metal yama empedansı Z_m değerlerine aşağıdaki gibi doğru orantılı olarak bağlantılıdır (Tretyakov ve Maslovski 2003):

$$Z_{yüz}^{-1} = Z_m^{-1} + Z_d^{-1}$$

Bahsedilen araştırmada yer alan soğurucu yapısına ait yüzey empedansı aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilmektedir (Tretyakov ve Maslovski 2003):

$$Z_{yüz}^{TE} = \frac{j\omega\mu_0 \frac{\tan(\beta h)}{\beta}}{1 - 2k_{eff}\alpha \frac{\tan(\beta h)}{\beta} \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\varepsilon_r + 1}\right)}$$

$$Z_{yüz}^{TM} = \frac{j\omega\mu_0 \frac{\tan(\beta h)}{\beta} \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\varepsilon_r + 1}\right)}{1 - 2k_{eff}\alpha \frac{\tan(\beta h)}{\beta} \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\varepsilon_r + 1}\right)}$$

Buradaki $\beta = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_r - k_t^2}$ dielektrik içerisinde ilerleyen dalga vektörüne ait olan normal bileşeni, h dielektrik alttaş kalınlığı, $k_{eff} = k_0 \sqrt{\varepsilon_{eff}}$ etkin dalga vektörü, $\varepsilon_{eff} = (\varepsilon_r + 1)/2$ etkin elektriksel geçirgenlik, ε_r dielektrik alttaşın elektriksel geçirgenlik değeri, θ dalga geliş açısı olmaktadır. D birim hücre kenar uzunluğu, ω iki metal yama arası mesafe olmak üzere, $\alpha = \frac{k_{eff}}{D} \ln\left(\frac{1}{\sin(\pi\omega/2D)}\right)$ kafes parametresi değeri olmaktadır. Metamalzeme soğurucu birim hücresinin yapısı nedeniyle dielektrik alttaş kalınlığı h değerinin gelen ışının dalgaboyu değerinden oldukça düşük olduğu kabul edilirse aşağıdaki gibi olmaktadır (Tretyakov ve Maslovski 2003):

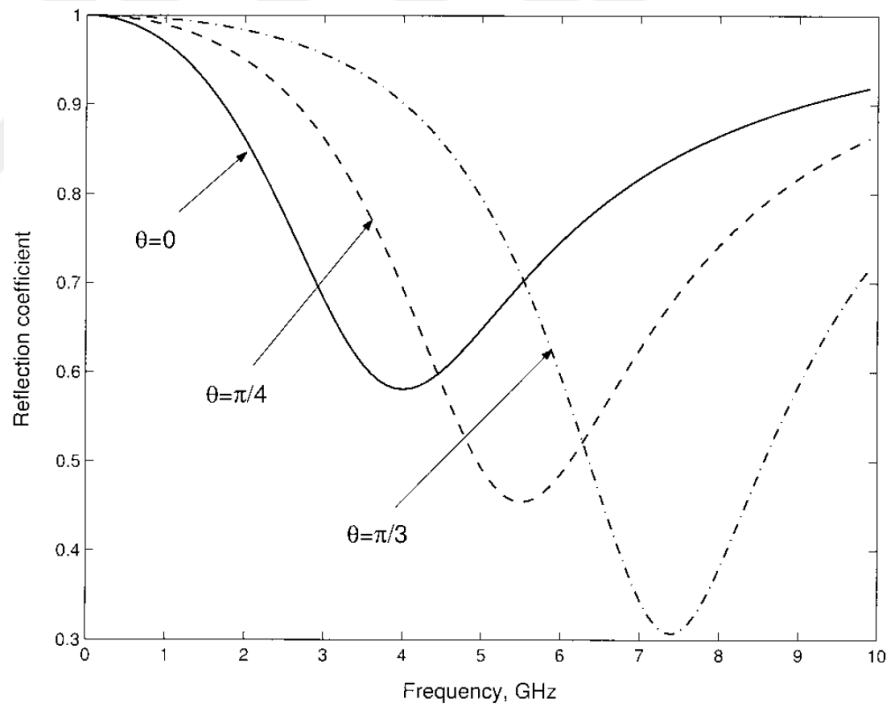
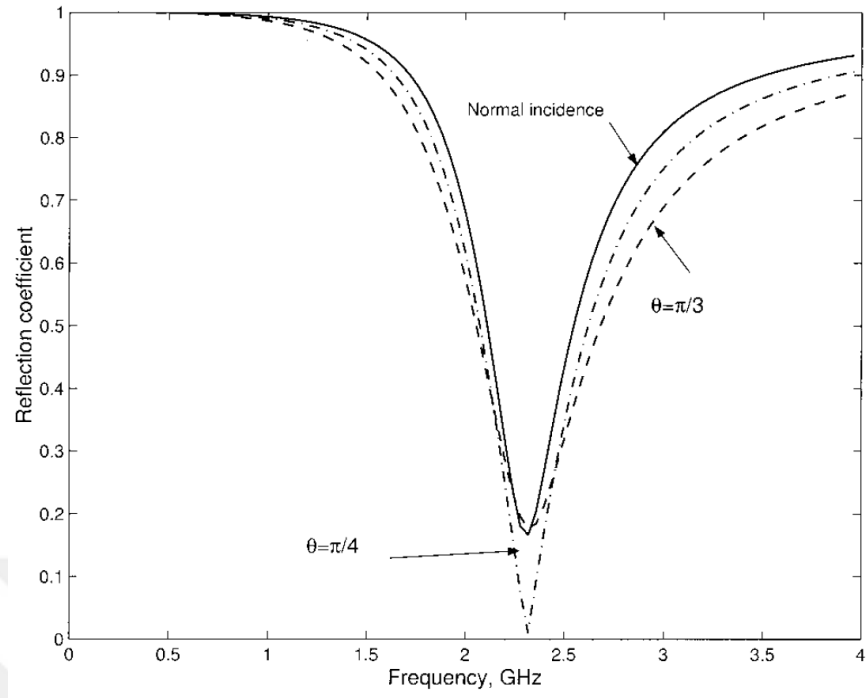
$$\tan(\beta h) / \beta \approx h$$

Bu durumda, yüzey empedansı denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$Z_{yüz}^{TE} = \frac{j\omega\mu_0 h}{1 - 2k_{eff}\alpha h \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r + 1}\right)}$$

$$Z_{yüz}^{TM} = \frac{j\omega\mu_0 h \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r + 1}\right)}{1 - 2k_{eff}\alpha h \left(1 - \frac{\sin^2(\theta)}{\epsilon_r + 1}\right)}$$

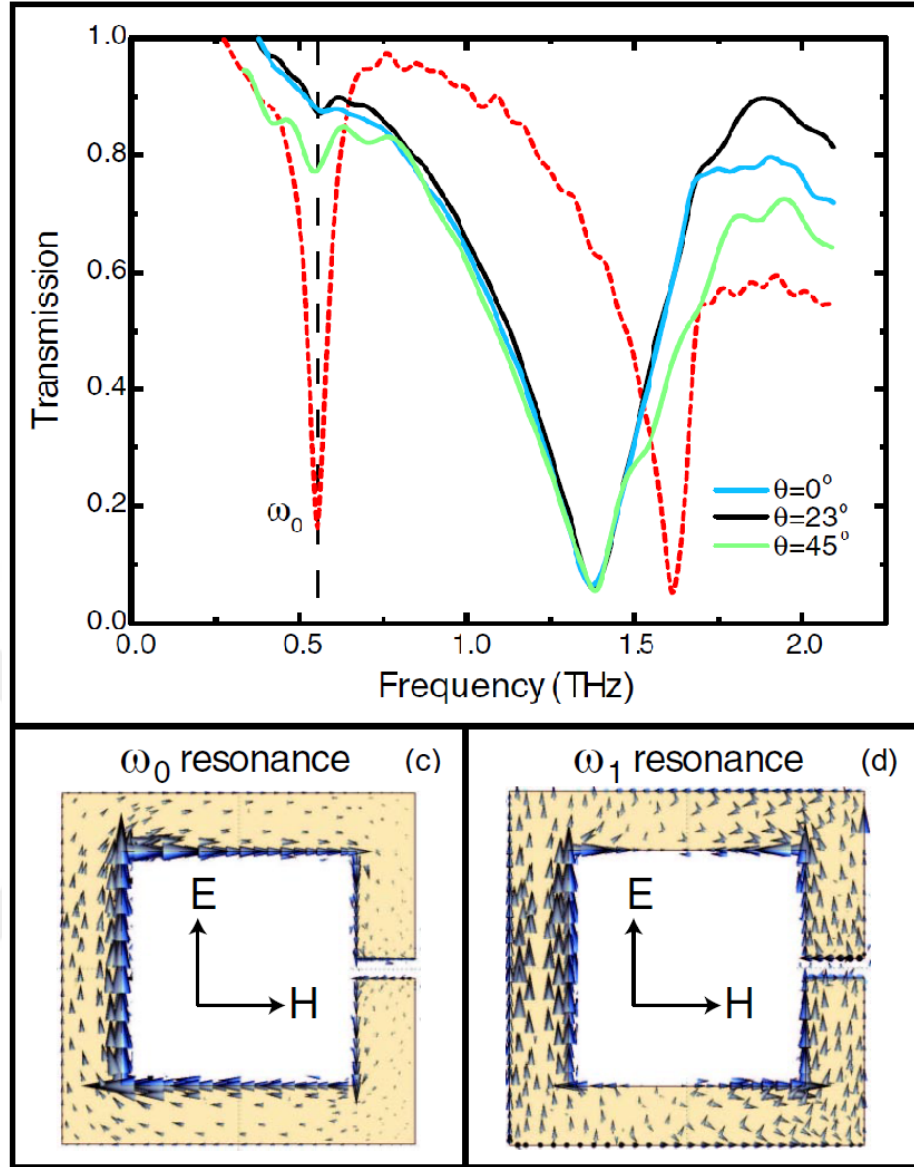
Yukarı denklemlerden görülebileceği üzere, açı değerine bağımlı bileşenler dielektrik altaşın elektrik geçirgenlik değeri ϵ_r ile ters orantılı olmaktadır. Bu bağlamda, yüzey empedansının açığa bağımlılığını yok ederek yüksek geliş açılarında verimli bir soğurma işlemi gerçekleştirmek için soğurucu yapısında yer alan dielektrik altaşın elektrik geçirgenlik değerinin artırılması olumlu bir etki sağlamaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 Tretyakov ve Maslovski (2003) tarafından geliştirilen soğurucu yapısının sırasıyla TM ve TE polarizasyonu ile farklı geliş açılarında gönderilen dalgalara ait yansımaya katsayısı oranları

3. METAMALZEME ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURUCULARI

Dielektrik ve iletken malzemelerin belirli şekillerde bir araya getirilerek elektromanyetik alanın elektriksel bileşeninin kontrol edilmesini sağlayan birçok yapı literatürde yer almaktadır (Kock 1948). Bunlar arasında en bilinen örnekler metalik ağ yapısı ve yama anten yapısı olmaktadır. Günümüze daha yakın tarihlerde geliştirilen, elektromanyetik alanın hem elektriksel hem de manyetik bileşeninin kontrol edilmesini sağlayan elektromanyetik metamalzemeler sayesinde ise doğal malzemeler ile elde edilemeyen yapay manyetizma, negatif kırılma indisi ve yüksek verimli elektromanyetik soğurma gibi gelişmiş özelliklerin elde edilmesi sağlanmıştır (Smith vd. 2000). Ancak bu gelişmiş özelliklerin elde edilebilmesi için yapay olarak geliştirilen bir metamalzeme yapısının, elektriksel ve manyetik alanlara eş zamanlı olarak etkin bir şekilde tepki vermesi gerekmektedir. Özellikle manyetik tepkinin elde edilmesi için tasarlanan yarıklı halka rezonatör yapıları ile mikrodalga, terahertz ve kızılötesi dalgaboylarında bahsedilen gelişmiş özellikleri gösteren yapay malzemeler elde edilebilmektedir. Teorik olarak yarıklı halka rezonatör yapılarında, oluşan manyetik rezonansa ait frekans değerinde aynı zamanda elektriksel rezonans da elde edilebilmektedir (Padilla vd. 2006). Tasarlanan metamalzeme yapısında gerçekleşen indüktif ve kapasitif rezonanslar sayesinde elektromanyetik dalganın elektriksel bileşenine etkin bir rezonans tepkisi oluşmakta ve söz konusu rezonansın gerçekleşmesi için metamalzeme yapısına ait olan etkin iletken yüzey yapısının geometrik tasarımı büyük önem taşımaktadır.



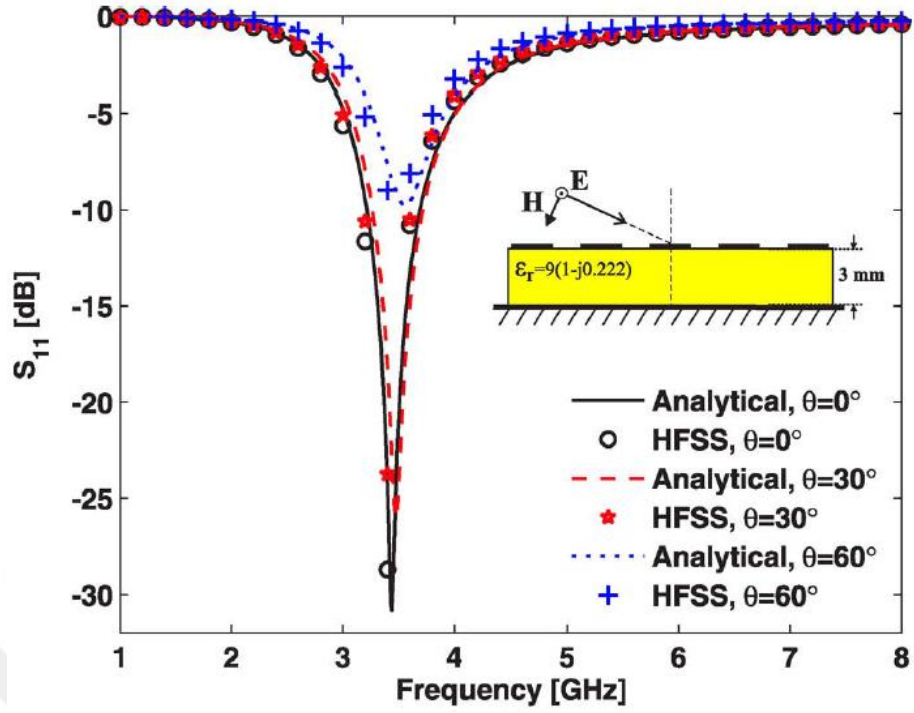
Şekil 3.1 Padilla vd. (2006) tarafından incelenen, ön yüzeyinde yarıklı halka rezonatörü ve arka yüzeyinde dielektrik alttaş içeren metamalzeme birim hücre yapısı

Şekil 3.1’de yer alan Padilla vd.’nin (2006) çalışmasında incelenen yarıklı halka rezonatörü yapısı $\omega_0 = 0.5$ THz ve $\omega_1 = 1.6$ THz frekans değerlerinde iki ayrı tepki göstermekte ve bu frekans değerlerinde oluşan yüzey akım yoğunlukları şekil 3.1’de gösterilmektedir. Yine şekil 3.1’de yer alan iletim grafiğindeki kırmızı eğri elektriksel tepkiyi, mavi eğri ise manyetik tepkiyi $\mu(\omega)$ göstermektedir. Burada görüldüğü gibi söz konusu çalışmada tasarlanan yarıklı halka rezonatörün dört yönlü simetrik yapıya sahip olmaması nedeniyle, gelen dalganın polarizasyonunun değişmesiyle soğurma verimi

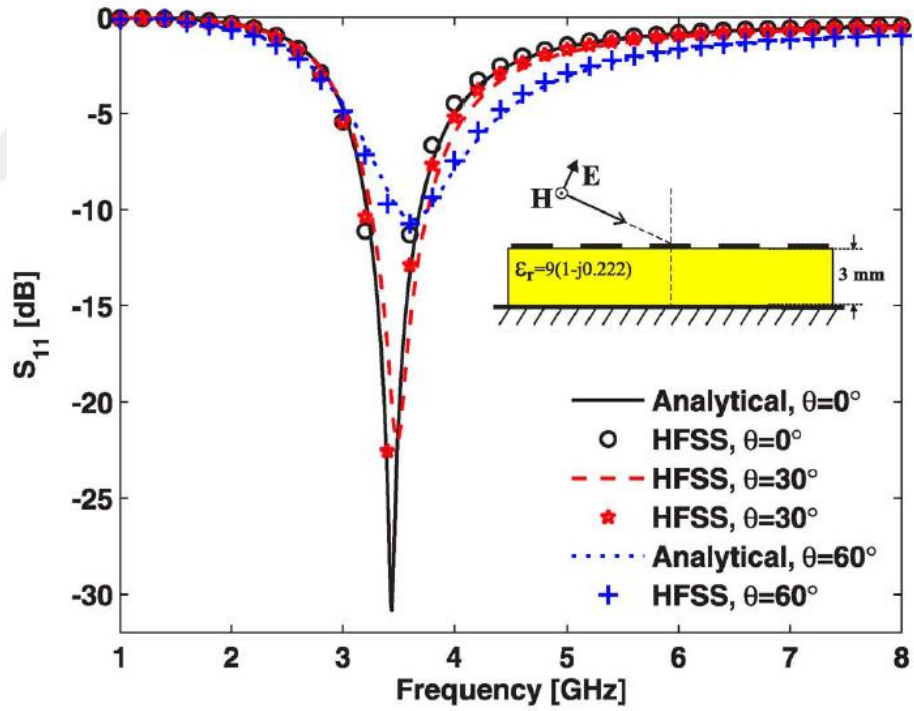
yüksek oranda azalmaktadır. Bu sebeple, $\omega_0 = 0.5$ THz frekans değerinde oluşan elektriksel tepkiyle dalga iletimi büyük oranda engellenirken, oluşan manyetik tepkiyle dalga iletimi çok düşük oranda engellenmektedir.

Metamalzeme soğurucuların periyodik dizilimlerle oluşan geniş yüzeyler şeklinde meydana getirilmeleri nedeniyle, soğurma verimleri, üzerlerine gelen elektromanyetik dalganın polarizasyon açısı ve geliş açısıyla doğrudan bağlantılı olmaktadır (Luukkonen vd. 2009).





(a)



(b)

Şekil 3.2 Luukkonen vd.'nin (2009) araştırmasında tasarlanan yüksek empedans yüzeyli mikrodalga soğurucu yapısının, TE (a) ve TM (b) polarizasyonlu dalgayı farklı geliş açıları altında yansıtma değerleri

Şekil 3.2’de yer alan Luukkonen vd. (2009) tarafından incelenen yüksek empedans yüzeyli mikrodalga soğurucu yapısının Ansoft’s High Frequency Structure Simulator (HFSS) ticari yazılımı ile gerçekleştirilen benzetim ölçümlerinde, periyodik dizilimli metal yama kaplı ön yüzeye farklı geliş açıları ile gönderilen elektromanyetik dalgalara ait yansıma değerlerini gösteren S_{11} büyüklük değerleri elde edilmektedir. Yapının arka yüzeyinin metal plaka ile kaplı olması sayesinde toplam iletim katsayısının sıfıra yaklaşması sağlanırken, soğurma veriminin belirlenmesi için ihtiyaç duyulan yansıma değerlerinin hem TE hem de TM polarizasyonu ile gelen dalga için ölçümleri alınmaktadır. Sonuç olarak hem TE hem de TM polarizasyonlu dalga için yüzeye dik $\Theta = 0^0$ ile gönderilen dalga için yaklaşık $S_{11} = -30$ dB büyüklüğünde yansıma elde edilirken, bu değer yüzeye $\Theta = 60^0$ ile gönderilen dalga için yaklaşık olarak $S_{11} = -10$ dB değerine kadar düşmekte ve yansıma büyüklüğünün dikkate alınmayacak kadar küçük değerlere ulaşması nedeniyle $\Theta = 60^0$ ‘den büyük geliş açıları için yeni ölçümler yapılmamıştır. Dolayısıyla, söz konusunu yapının soğurma verimi geliş açısının büyümesiyle birlikte parabolik olarak azalmaktadır.

Geliş açısına bağlı soğurma veriminde görülen büyük azalma nedeniyle, mevcut araştırmalarda geliştirilen farklı metamalzeme soğurucu yapılarında soğurma verimi genellikle TE polarizasyon ve yüzeye dik geliş açısı altında ölçülmektedir. Bu sayede, laboratuvar gibi ideal koşullar altında soğurucu yapısının gösterdiği maksimum soğurma verimi değerlerinin ölçülmesi sağlanmaktadır. Ancak, gerçek ve sanayiye uygun kullanımda, soğurma verimini tüm geliş açıları ve polarizasyon açıları altında koruyabilen soğurucu yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, araştırma dünyasında hem dalga geliş açısı ve hem de polarizasyon açısı değişimleri altında stabil soğurma gerçekleştirebilen, kısaca yönden bağımsız olarak ifade edilen mikrodalga soğurucuların geliştirilmesine yönelik çalışmalar önem kazanmaktadır.

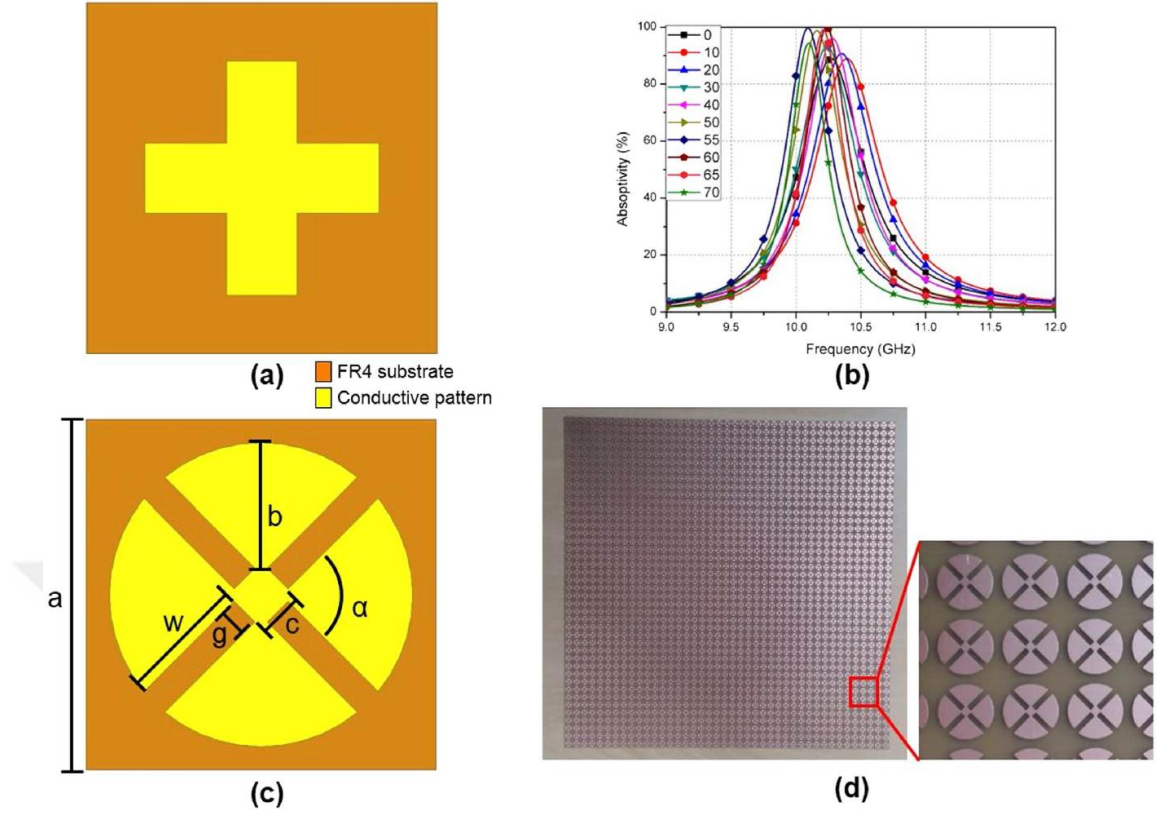
3.1 Yönden Bağımsız Metamalzeme Soğurucular

Bir metamalzeme soğurucu tipik olarak elektronik devre kartı yapımında kullanılan dielektrik malzeme benzeri dielektrik özellikte bir malzemeyle üretilen alttaş ve bahsedilen alttaş üzerine kaplanan veya şekillendirilen, periyodik dizilime sahip,

genellikle bakır olarak tercih edilen metal iletim yollarından meydana gelmektedir. En üst tabakada konumlu olan metal yol geometrisi etkin indüktans ve etkin kapasitans değerlerini etkilemekte ve toplam kaybın çoğu alttaş sayesinde gerçekleşmektedir. Soğurucu yapısında kullanılan alttaşın dielektrik özellikleri ve metal yolun geometrik örüntüsü, tekli veya çoklu dar bant soğurma ya da geniş bant soğurma tiplerinden hangisinin gerçekleştirileceğini belirlemektedir. Dar bant soğurma gerçekleştiren yapılar daha çok ön metalik örüntüde gerçekleşen rezonanslara bağlı olarak çalışmakta ve dielektrik alttaş ise soğurmayı sağlamaktadır. Ön yüzeydeki metal yollar küçük ohmik kayıplar sunmakta ve bu işlem yüksek verimli soğurma gerçekleştirmek için yeterli olamamaktadır. Bu sebeple, bu tür soğurucu yapılarında kayıp oranı yüksek dielektrik malzemeler tercih edilmektedir. Dar bant soğurucuları, tek veya birden çok frekans değerinde yüksek soğurma gerçekleştirmelerinden ötürü özellikle sensör, görüntüleme cihazları, bolometreler, elektromanyetik filtre benzeri cihazların yapımında kullanılmaktadır.

Landy vd. (2008) tarafından önerilen model, ince profil, kolay üretim, ticari ulaşılabilirlik ve etkin kullanım elde edilmesi açısından ilk örnek alınması gereken çalışmadır. Sonraki yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda soğurucu dizaynları geliştirilerek arka yüzeyin tamamen metal tabak ile kaplanması sağlanmıştır. En alt yüzeyde tamamen metal tabaka kullanılması, soğurucuya gelen dalganın iletiminin tamamen engellenmesini sağlamakta ve böylece etkin soğurma verimine sahip soğurucunun tasarlanması için çoğunlukla yansıma katsayısını etkileyen, üst yüzeydeki metal yolların oluşturduğu geometrik örüntünün tasarlanmasına odaklanmayı sağlamaktadır.

Lee vd. (2016) tarafından geliştirilen bir dar bant soğurucu yapısı, kare şeklinde bir merkez metalik yamayı ve bu yamaya bağlı dört adet çeyrek daire şeklindeki metalik yamaları içeren ön yüzey; dielektrik orta tabaka ve arka yüzeyi kaplayan metal tabakadan oluşmaktadır.



Şekil 3.3 Lee vd. (2016) tarafından geliştirilen soğurucunun merkez (a) ve tüm (b) yama yüzeyi ile farklı geliş açıları altında yapının soğurma yüzdeleri (c) ve üretilen test numunesi (d) görselleri. Boyutlar: $a=6$ mm, $b=2.2$ mm, $c=0.8$ mm, $g=0.5$ mm, $w=2.3$ mm ve $\alpha=90^\circ$

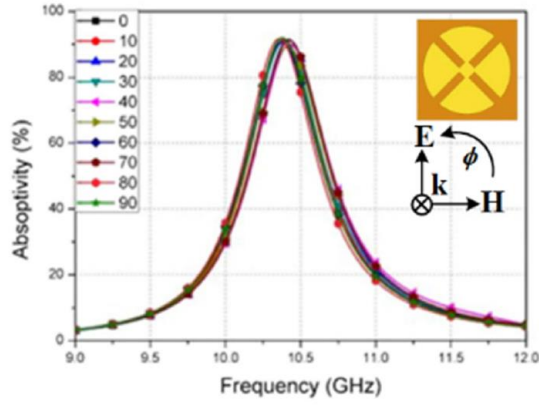
Ön bakır tabakadaki metal kaplı örüntü eşdeğer indüktans L değerini ve çeyrek daireler arasındaki ayrıklar ise kapasitans C değerlerini vermektedir (Şekil 3.3). Topraklanmış dielektrik tabaka kısa devre bağlantısı gibi davranarak imajiner empedans değerini belirlemektedir. Eşdeğer direnç R değeri, sonlu iletken metal tabaka ile elde edilmektedir. Böylece, yapının giriş empedansı aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Costa vd. 2010):

$$Z_{in} = \{R + j\omega L + 1/j\omega L\} \parallel Z_d$$

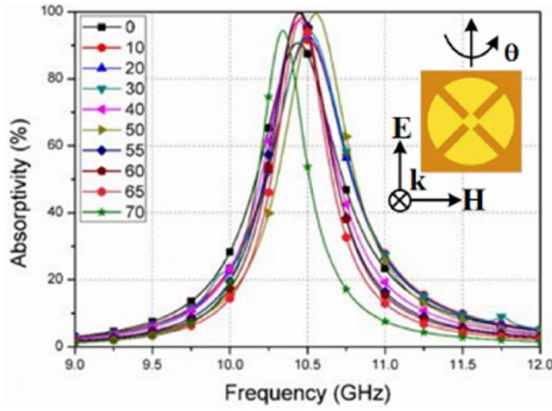
$$Z_d = j\sqrt{\mu_r\mu_0/\varepsilon_r\varepsilon_0} \tan(kt)$$

Buradaki ε_r bağıl elektriksel geçirgenliğin gerçel elemanı ve μ_r ise bağıl manyetik geçirgenliğin gerçel elemanı olmakta, $k = k_0\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}$ değeri gelen elektromanyetik dalganın dalga sayısını ifade etmektedir. Bu bilgilerden yola çıkılarak soğurucunun ön

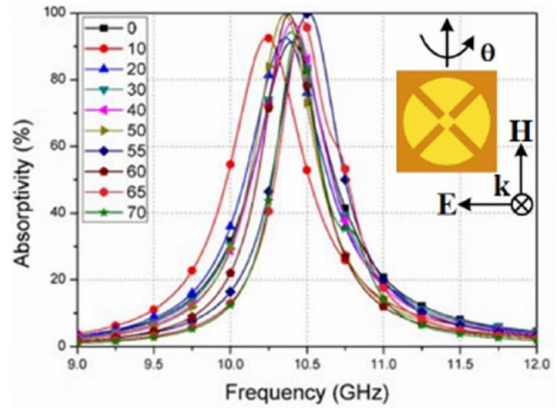
tabakasında bulunan metal örüntünün topolojik yapısının değiştirilmesi ile yapının giriş empedansı Z_{in} değerinin, boş uzay empedansı Z_0 değerine eşlenmesi ve bu sayede, yansımaya katsayısı değerinin minimuma indirgenmesi sağlanmaktadır. Yapının arka yüzeyinin tamamen metal tabakası ile kaplanması sonucunda dalga iletim değerinin de sıfıra indirgenmesi vasıtasıyla, gelen elektromanyetik dalganın belirli bir frekans değerinde tamamen soğurulması sağlanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

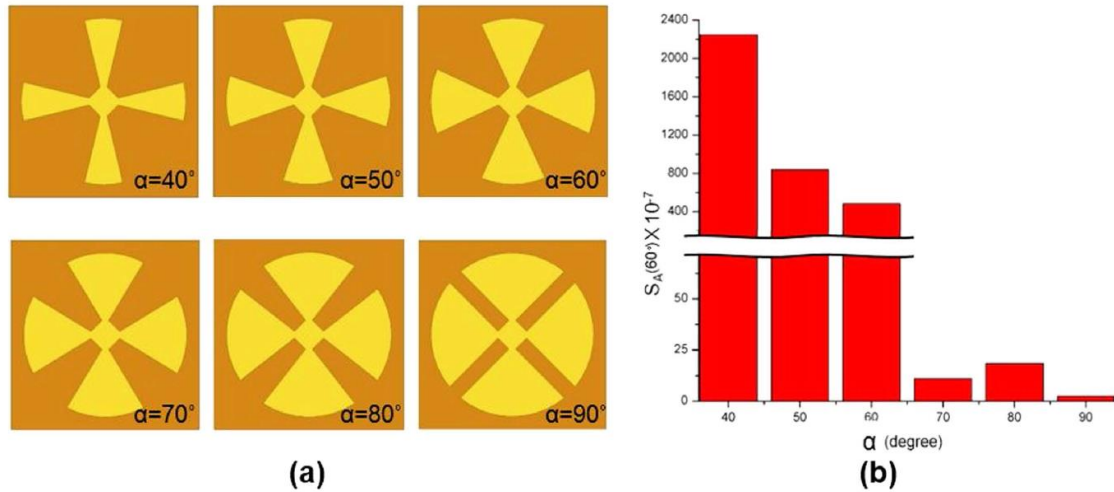
Şekil 3.4 Lee vd. (2016) tarafından önerilen soğurucu yapısının, farklı polarizasyon açıları (a), TE polarizasyonu ve farklı geliş açıları (b), TM polarizasyonu ve farklı geliş açıları (c) altında elde edilen benzetim ölçümleri

Şekil 3.4'te gösterilen söz konusu çalışmada önerilen soğurucu yapısı ile 10.44 GHz frekans değerinde, normal geliş açısı $\Theta = 90^0$ ile %91 oranında soğurma gerçekleştirilmektedir. Yapının farklı polarizasyon açıları Φ ve farklı geliş açıları Θ

altında gösterdiği soğurma oranları hem benzetim ölçümleri hem de deneysel olarak elde edilmektedir. Farklı geliş açıları altında soğurma oranlarının incelenmesi esnasında iki ayrı dalga polarizasyon modu göz önüne alınmaktadır. Bunlardan ilki, gelen dalgaya ait elektriksel alan sabit tutulurken manyetik alanın Θ açısı ile birlikte döndürüldüğü, enine elektriksel polarizasyon TE modu; ikincisi ise, gelen dalgaya ait manyetik alan sabit tutulurken elektriksel alanın Θ açısı ile birlikte döndürüldüğü TM modu olmaktadır. Söz konusu yapı, $\Theta = 70^\circ$ geliş açısı değerine kadar %90 ve üzeri değerlerde soğurma gerçekleştirirken, soğurma frekansı açığa bağlı olarak yaklaşık %0,96 oranında kaymaktadır. Ancak, bu çalışmada önerilen yapının kendine özgü tasarımı nedeniyle, ön yüzeydeki metal yama örüntüsünün değiştirilerek oluşan indüktif ve kapasitif etkiler üzerinde fazla müdahale yapılmasına imkan vermemektedir. Yapı üzerindeki tek değişken olan α değerinin optimize edilmesi için aşağıdaki açısal hassasiyet denklemi kullanılmaktadır (Lee vd. 2016):

$$S_A(\theta) = \frac{(f_\theta - f_0) \times [A(\theta, f_\theta) - A(0, f_0)]}{(\theta - 0)^2}$$

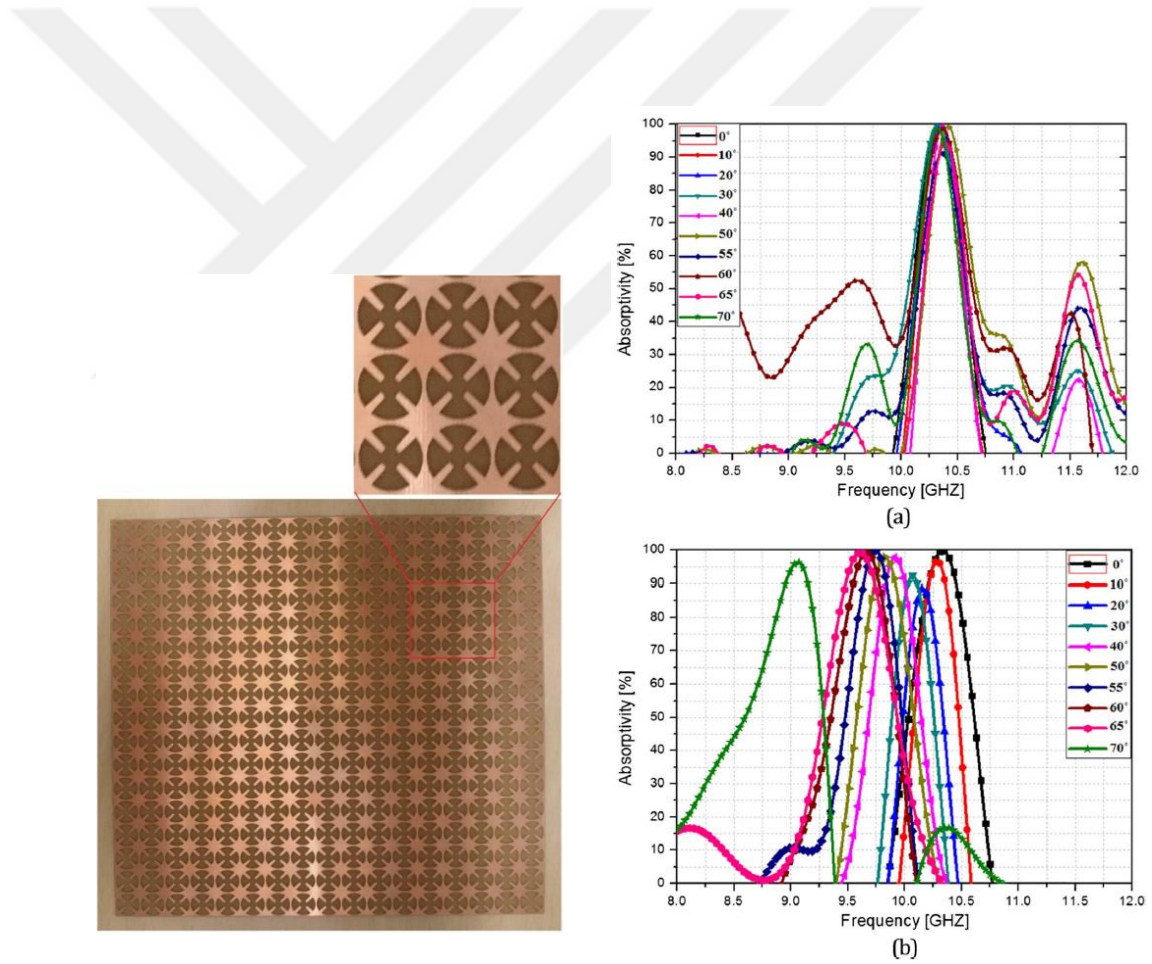
Buradaki f_θ ve f_0 , sırasıyla θ ve 0 derecelerindeki rezonans frekansları; A değerleri ile ilgili frekanstaki soğurma büyüklükleri olmaktadır.



Şekil 3.5 Farklı α açısı değerlerinde tasarlanan yüzeyler (a) ve her bir yüzeyin açısal hassasiyet değerleri (b) (Lee vd. 2016)

Yapı üzerindeki yarıklara ait genişlik, açığa bağlı soğurma hassasiyeti en düşük olan $\alpha = 90^0$ değerinde tasarlanarak en yüksek soğurma verimini elde edilecek şekilde optimize edilmektedir. Ancak, en stabil soğurma verimi için optimize edilen bu tasarımla bile 0^0 ila 70^0 geliş açısı değerleri arasında yapılan ölçümlerde elde edilen en düşük soğurma verimi oranının %90'ın üzerine çıkması sağlanamamaktadır (Şekil 3.5).

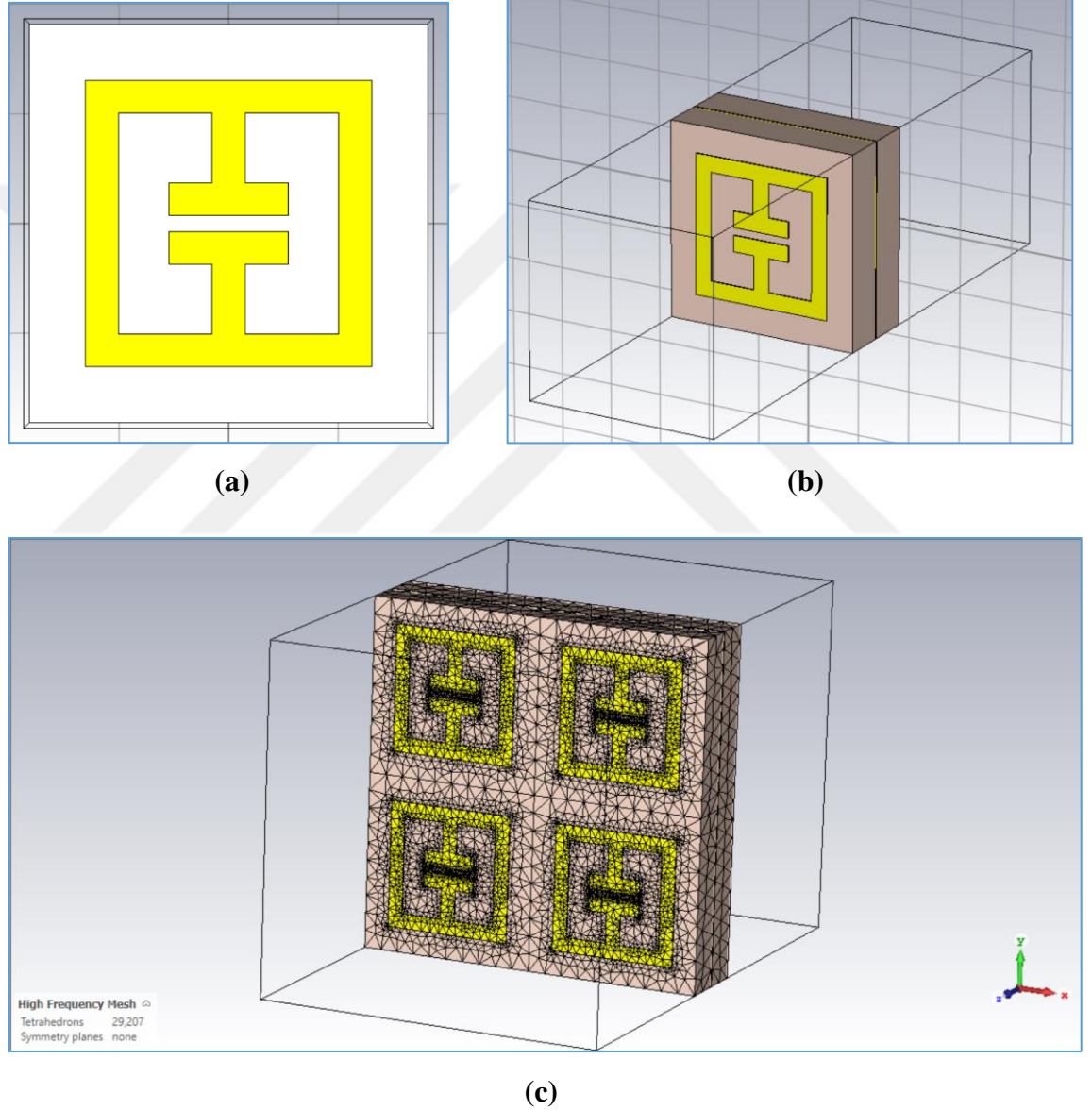
Yukarıdaki soğurucu tasarımının geliştirilmesiyle Trung vd. (2016) tarafından geliştirilen benzer bir soğurucu yapısı ile 10.05 GHz frekans değerinde yaklaşık %91,48 oranında soğurma elde edilmekte ve TE polarizasyonu altında 70^0 geliş açısına kadar gönderilen dalganın yaklaşık %90 oranında soğurulması sağlanmaktadır. Ancak, TM polarizasyonu altında gözlenen soğurma frekanslarının kayma oranı yüksektir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Trung vd. (2016) tarafından geliştirilen soğurucu yapısının TE polarizasyonu ve farklı geliş açıları altında soğurma oranları (a) ve TM polarizasyonu ve farklı geliş açıları altında soğurma oranları (b)

4. YÖNDEN BAĞIMSIZ METAMALZEME SOĞURUCU TASARIMI

Öncelikle mevcut geliştirilen yapıya öncü olması ve benzetim yazılımı üzerinde gerçekleştirilen test ayarlarının doğruluğunun kontrol edilmesi açısından, Tao vd. (2008) tarafından geliştirilen soğurucu yapısı incelenmiştir.

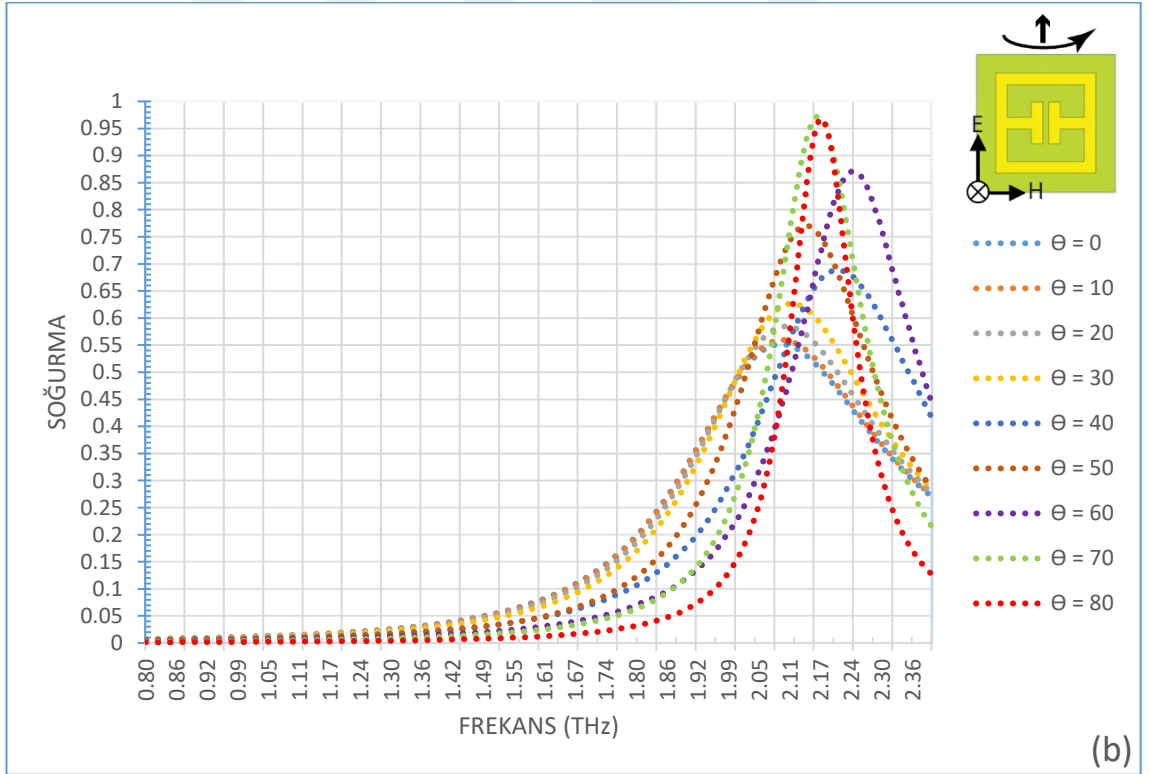
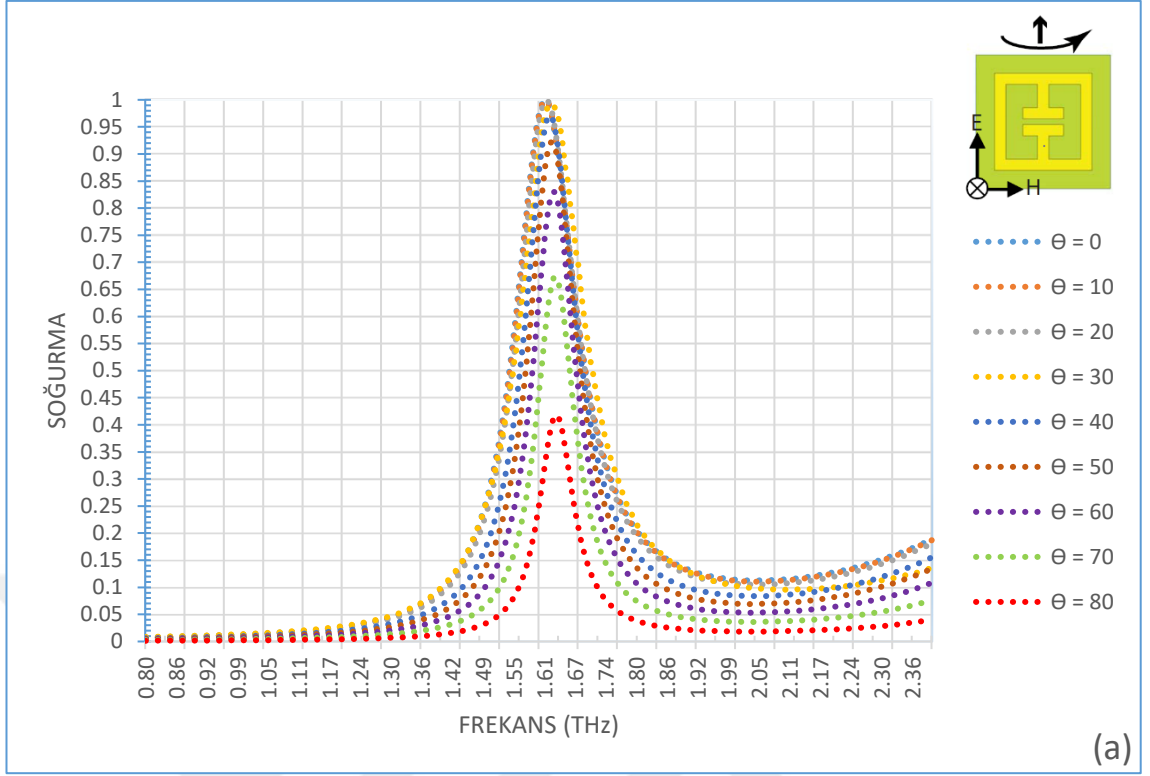


Şekil 4.1 Tao vd.'nin (2008) önerdiği THz frekans bandında çalışan soğurucunun CST Microwave Studio ticari yazılımı üzerinde modellenmesinin önden (a), perspektif (b) ve ağ görünümü (c)

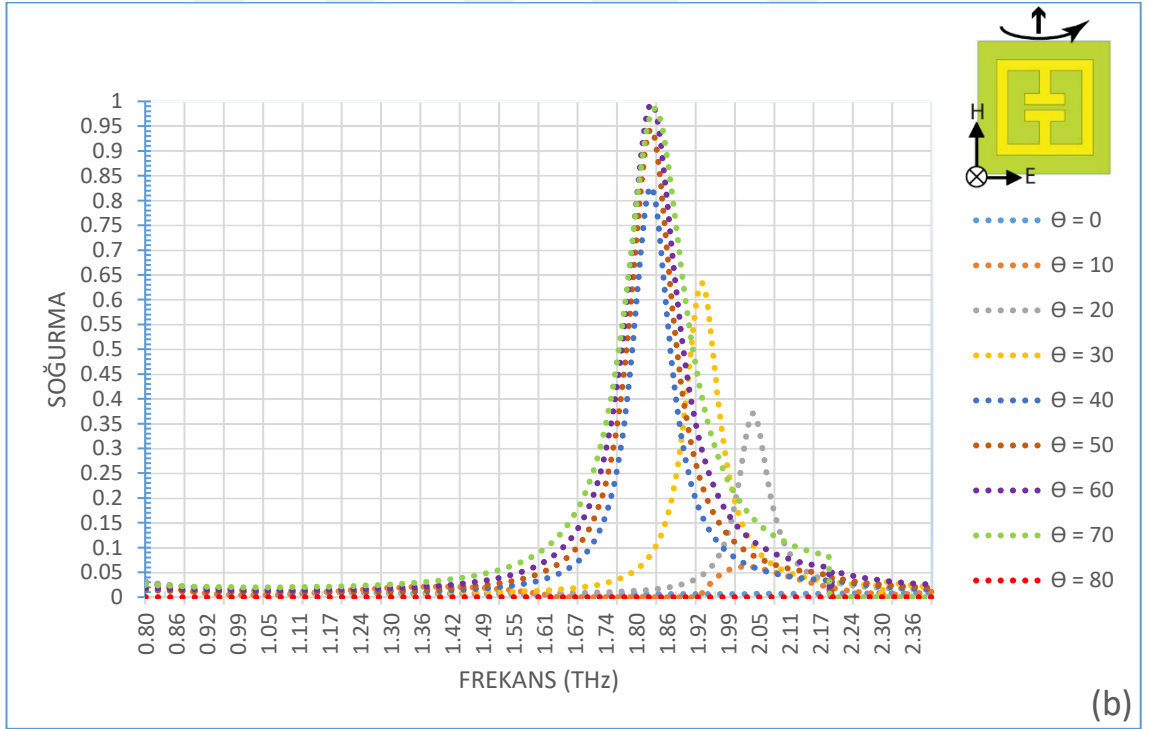
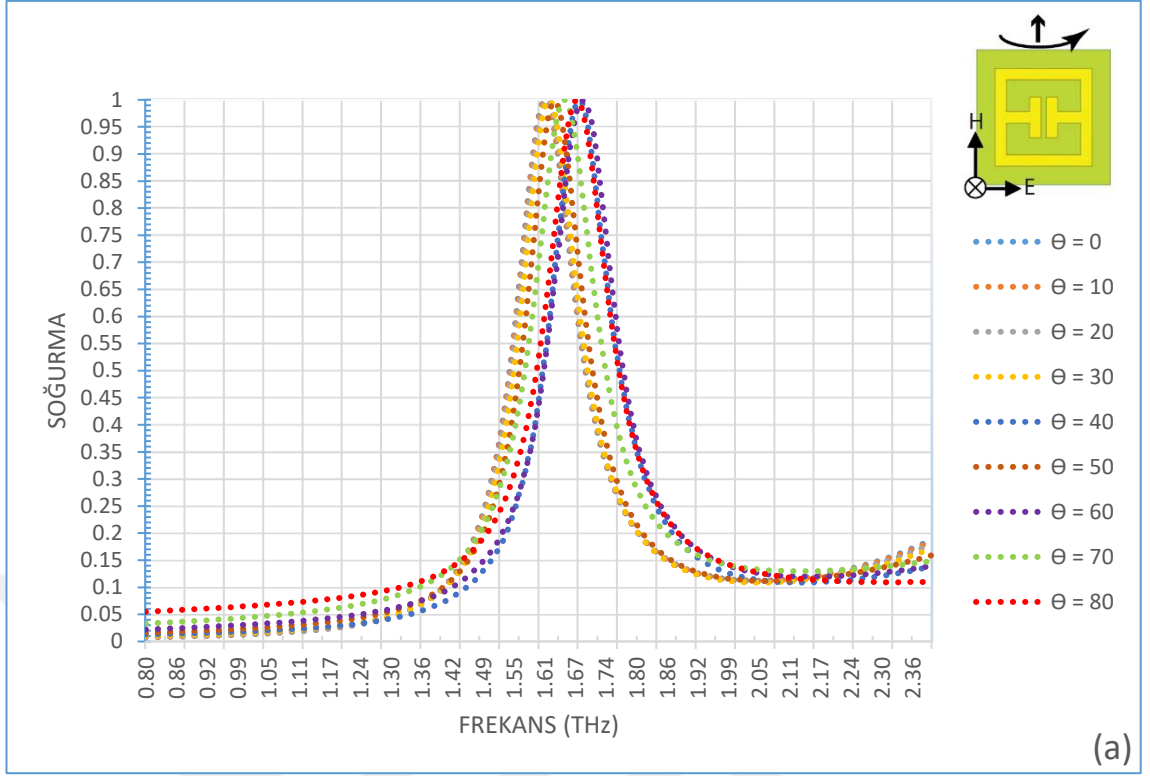
THz frekans aralığında, TM polarizasyonunda 80⁰'den düşük geliş açılarında %99'un üzerinde; TE polarizasyonunda 50⁰'ye kadar olan geliş açılarında %90'ın üzerinde soğurma elde edilen soğurucu tasarımı, ilgili araştırmada verilen yapı ölçülerine sadık kalınarak yeniden modellenerek ve numerik analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Tasarım ve numerik analizler, sonlu integral yöntemi kullanan CST Microwave Studio isimli ticari yazılımı vasıtasıyla, periyodik sınır koşulları uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Numerik analizlerin gerçekleştirilmesi için benzetim işlemine ait özelliklerin belirlenmesinde “Floquet Port” uyarım ayarları, tek bir birim hücre yapısının x ve y eksenini doğrultusunda periyodik olarak dizilerek sonsuz bir düzlem oluşturmasına yönelik olarak seçilmekte ve elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusu z eksenini belirlemiştir. Dielektrik alttaş malzemesi olarak elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon = 2.88 + 0.09i$ ve dielektrik kayıp değeri $\tan(\delta) = \epsilon_2/\epsilon_1 = 0.313$ olarak ayarlanmış polimit; ön ve arka yüzeyde yer alan iletken tabakalar için de frekanstan bağımsız elektriksel iletkenlik değeri $\sigma = 4.09 \times 10^7$ olan altın kullanılmıştır. Yapının arka yüzeyinin tamamen metal tabaka ile kaplı olması sayesinde dalga iletim değeri sıfıra yaklaştırılarak soğurmanın yalnızca yansıma katsayısı ile belirlenmesi sağlanmıştır. Yansıma katsayısı, S_{11} saçılma parametrelerinden aşağıdaki denklem yardımıyla elde edilmiştir (Fujishiro 2012):

$$S_{ij}(dB) = 20 \log |S_{ij}(\omega)|$$

Yapılan benzetim ölçümleri sonucunda ilgili araştırmada yer alan sonuçlara yakın soğurma değerleri elde edilmiştir. Modellenen soğurucu yapısının $\Phi = 0^0$ 'de normal pozisyonda ve $\Phi = 90^0$ 'de döndürülmüş pozisyondayken hem TE hem de TM polarizasyonu ve farklı dalga geliş açısı Θ değerleri altında ölçümleri alınarak kıyaslanmıştır.



Şekil 4.2 Tao vd.'nin (2008) geliştirdiği soğurucu yapısının, $\Phi = 0^\circ$ (a) ve $\Phi = 90^\circ$ (b) pozisyonunda, TE polarizasyonu ve farklı geliş açıları altındaki soğurma değerleri

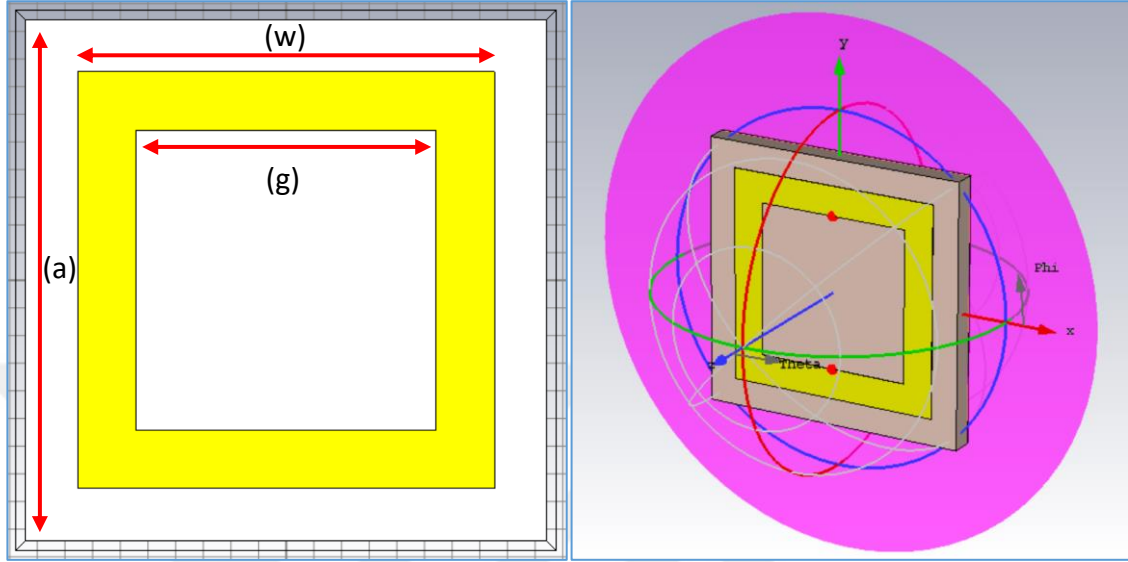


Şekil 4.3 Tao vd.'nin (2008) geliştirdiği soğurucu yapısının, $\Phi = 90^\circ$ (a) ve $\Phi = 0^\circ$ (b) pozisyonunda, TM polarizasyonu ve farklı geliş açıları altındaki soğurma değerleri

Yapılan benzetim ölçümlerinden elde edilen güncel sonuçlarda, TE polarizasyonu altında yapı $\Phi = 0^0$ pozisyonundayken farklı geliş açıları ile yapılan ölçüm sonuçlarının 2008 yılında yayınlanan orijinal makaledeki sonuçlar ile aynı olduğu görülmüştür (Şekil 4.2-4.3). Benzer şekilde, TM polarizasyonu altında yapı $\Phi = 90^0$ pozisyonundayken farklı geliş açıları ile yapılan ölçümlerden alınan sonuçlar da ilgili makaledeki sonuçlar ile eşleşmektedir. Ancak, ilgili makale içeriğinden farklı olarak her iki polarizasyon modu için yapının 90^0 döndürülerek test edilmesiyle, $\Phi = 90^0$ pozisyonu ile TE polarizasyonu altında ve $\Phi = 0^0$ pozisyonu ile TM polarizasyonu altında yapının gösterdiği soğurma verimleri belirgin ölçüde azalmaktadır. Bu durum, soğurucu yapısını yüzey geometrisinin dört yönlü simetri özelliğini içermemesinden ileri gelmektedir. Söz konusu pozisyonlarda yapı üzerine 0^0 'den büyük geliş açılarında gönderilen dalğanın gördüğü metal iletim yolu uzunluğu ve ayırık genişliği değerlerinin değişerek yapının rezonansa bağlı indüktif ve kapasitif değerlerinin değiştiği göstermektedir. Bu anlamda, yapılan güncel ölçümler sonuçlarının incelenmesi ile polarizasyon açısı Φ değerinin değişmesiyle soğurma değerlerinin değişmediği bir soğurucu yapısının elde edilmesi için geliştirilecek bir yapının dört yönlü simetri özelliğine sahip olması gerektiği görülmektedir. Ayrıca, Tao tarafından geliştirilen yapıda iki dielektrik katman kullanılması ve kullanılan dielektrik malzemenin elektriksel geçirgenlik ϵ ve kalınlık değerleri t_1 ve t_2 özellikle iletken tabakalar arasındaki rezonans sonucunda ortaya çıkan manyetik soğurma değerlerini büyük oranda etkilemektedir. Bahsedilen elektriksel geçirgenlik ϵ ve kalınlık t_1 ve t_2 değerlerinin değiştirilmesi ile rezonans frekansı ve yansıma değerlerinde değişimler gözlenmiştir.

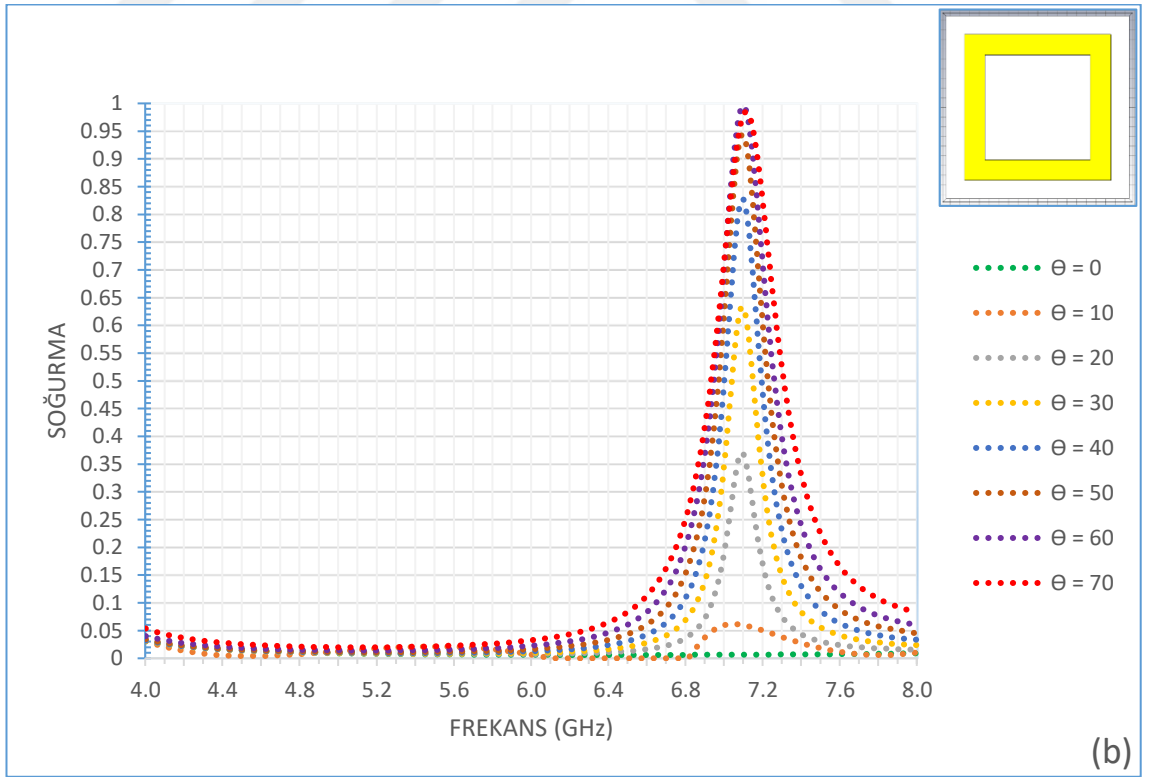
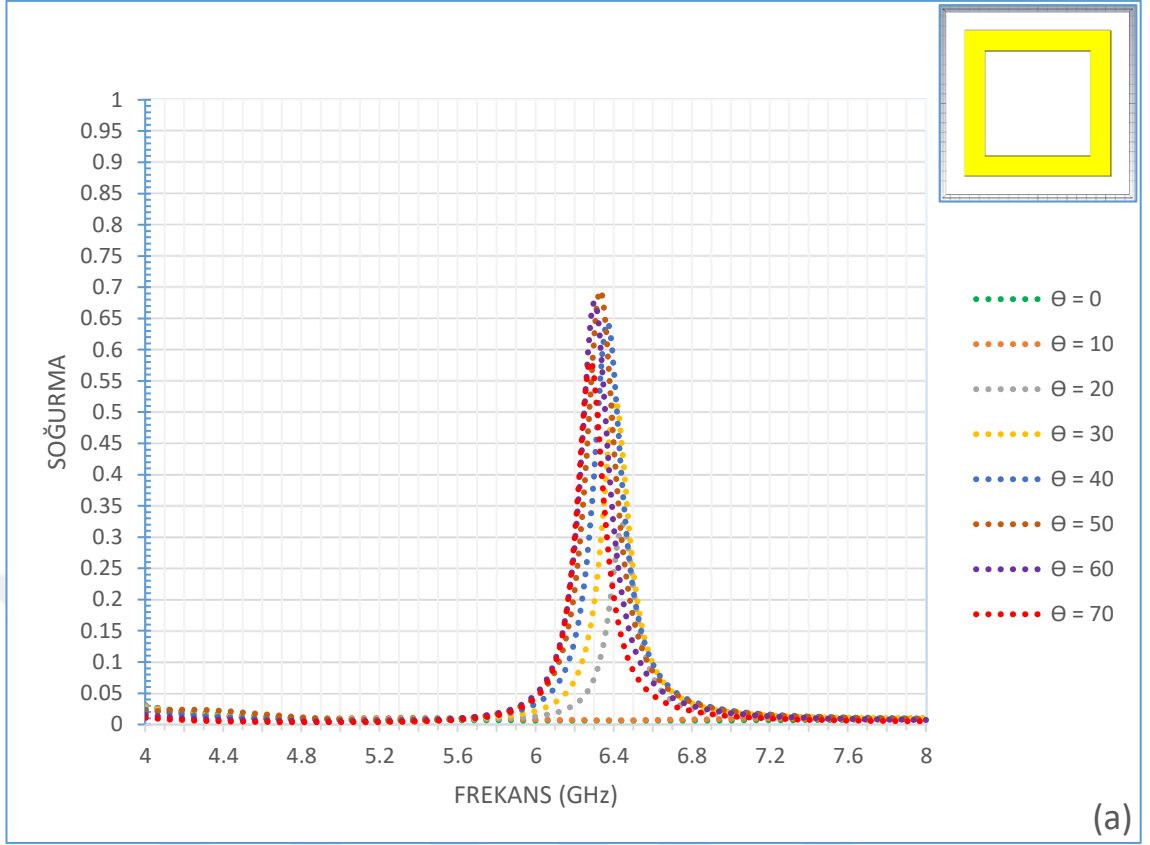
Mevcut çalışmada GHz frekans değerlerinde çalışacak şekilde üretilen güncel soğurucu yapıları baz alınarak alümin malzemesi olarak dielektrik özellikleri yüksek, üretim kolaylığı ve bulunabilirlik açısından avantajlı olan FR4 malzemesi tercih edilmiştir. Söz konusu dielektrik tabakanın arka yüzeyi tamamen bakır tabaka ile kaplı olurken, ön yüzey bakır iletim yolları ile biçimlendirilmiştir. Dielektrik alümin malzemesi olarak seçilen FR4 malzemeye ait elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon = 4.3$ ve dielektrik kayıp değeri $\tan(\delta) = \epsilon_2/\epsilon_1 = 0.025$ iken ön ve arka yüzeyde yer alan iletken tabakalar için seçilen bakırın frekansa bağımsız elektriksel iletkenlik değeri $\sigma = 5.8 \times 10^7$ (S/m) olarak belirlenmiştir. İlk olarak, dalga geliş açısına bağlı soğurma değeri değişiminin TE polarizasyonu ve TM polarizasyonu altındaki değişiminin net bir şekilde gözlenmesi için ön yüzeyinde temel

bir halka rezonatörü ve arka yüzeyinde tüm yüzeyi kaplayan metal tabaka yer alan bir birim hücre yapısı modellenerek numerik analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 GHz mertebesinde tepki vermek üzere modellenen birim hücre yapısının önden ve yandan görünümü. Boyutlar: $a = 18.75$ mm, $w = 15$ mm, $g = 10.8$ mm

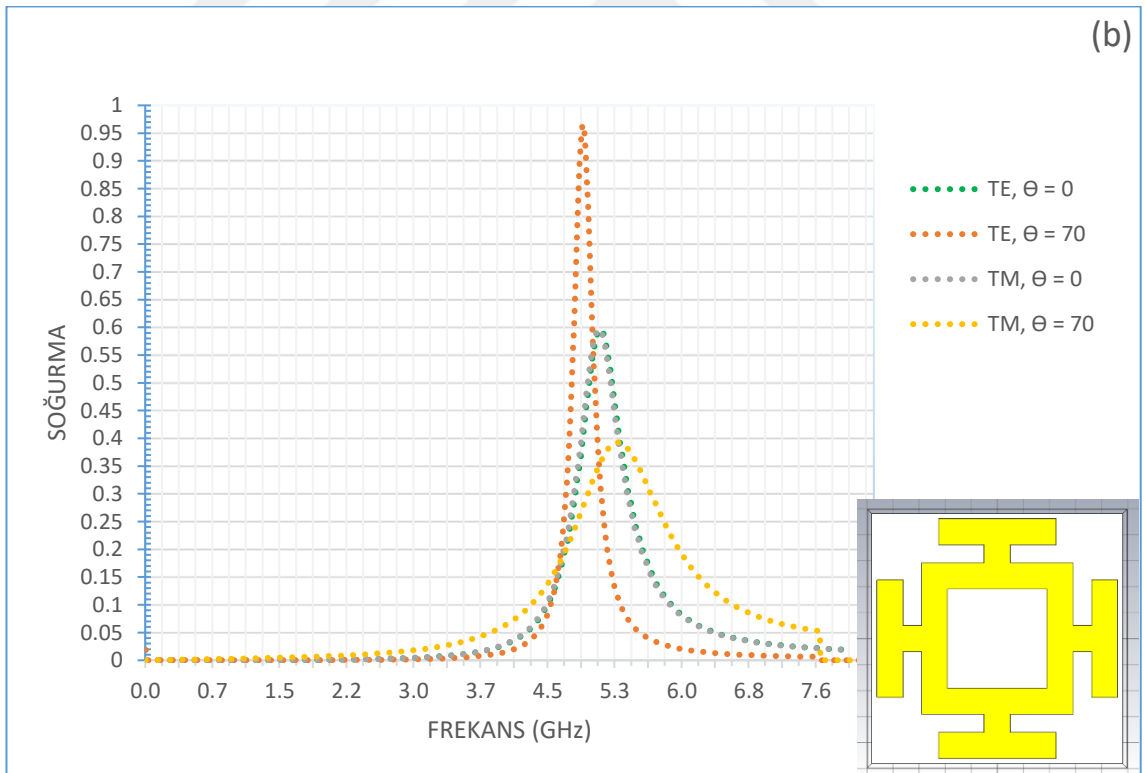
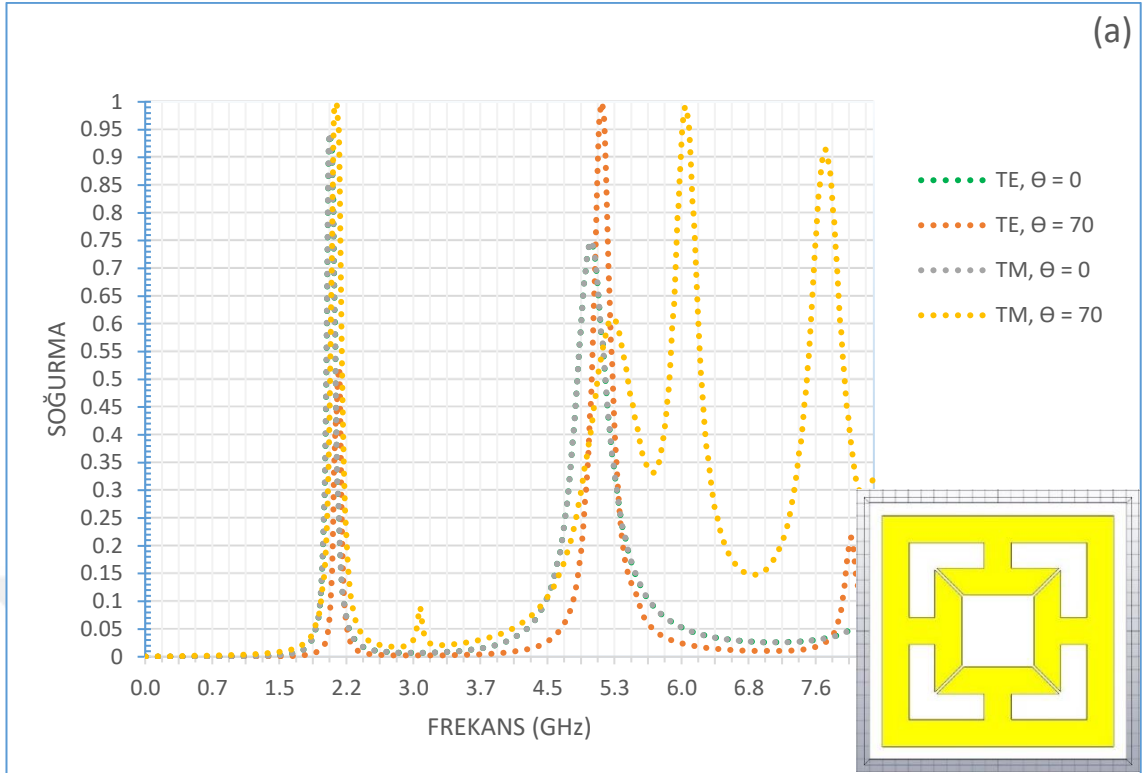
Modellenen birim hücre yapısı ölçüleri GHz frekans değerlerinde çalışmak üzere belirlenmiş ve dielektrik tabaka kalınlığı mevcut FR4 kart ölçülerine uygun olarak $s = 1.6$ mm; bakır tabaka kalınlığı ise $z = 0.035$ mm olarak ayarlanmıştır. Numerik analizlerin gerçekleştirilmesi için benzetim işlemine ait özelliklerin belirlenmesinde “Floquet Port” uyarım ayarları, tek bir birim hücre yapısının x ve y eksenı doğrultusunda periyodik olarak dizilerek sonsuz bir düzlem oluşturmasına yönelik olarak seçilmekte ve elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusu z eksenı olarak belirlenmiştir.

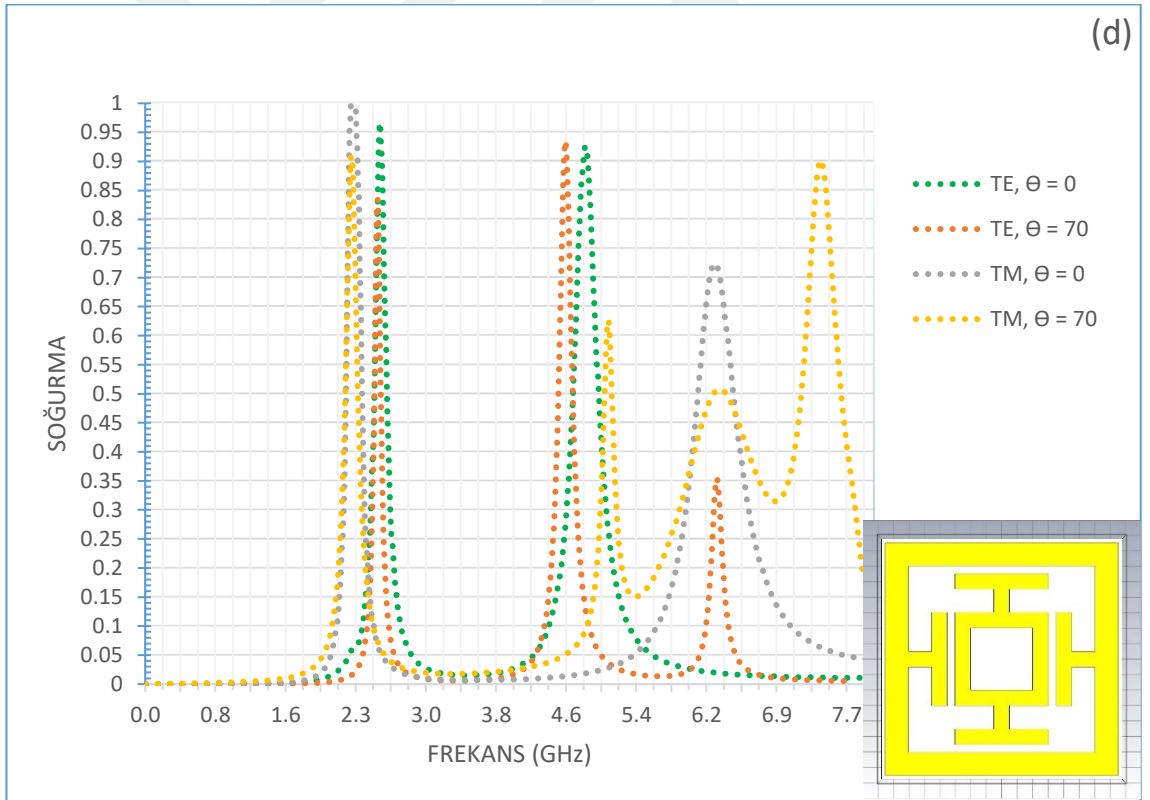
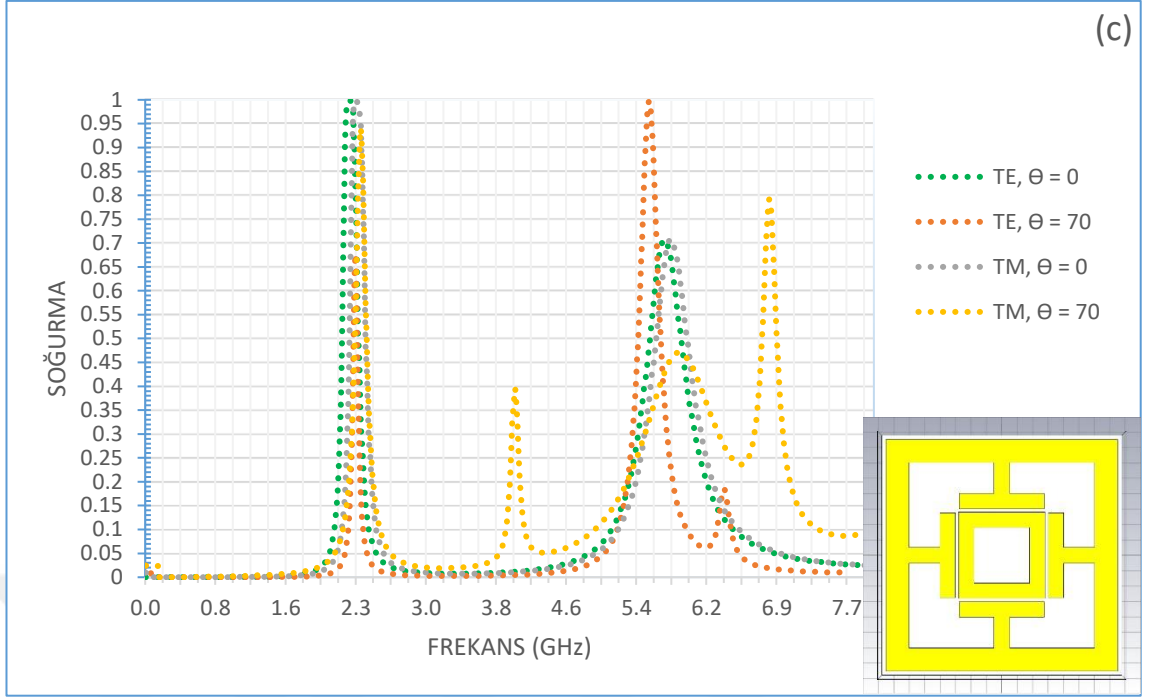


Şekil 4.5 Modellenen birim hücre yapısının TE (a) ve TM (b) polarizasyonu ile farklı geliş açılırlarındaki soğurma değerleri

Modellenen birim hücre yapısının TE polarizasyonu altındaki soğurma ölçümlerinde, farklı dalga geliş açıları altında, 6.3 GHz frekans değeri etrafında değişken soğurma değerleri verdiği gözlenmektedir (Şekil 4.5.a). Özellikle yüzeye dik $\Theta = 0^0$ ve geliş açısı düşük değerlerde söz konusu birim hücrelerden oluşan periyodik bir yüzey üzerindeki halkaların arasındaki boşlukların büyük olması nedeniyle soğurma değerinin sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Geliş açısının büyümesiyle birlikte dalganın gördüğü açıdaki halka aralıklarının daralması nedeniyle soğurma değeri yükselmekte ancak hiçbir şekilde %70'in üzerine çıkamamaktadır. Ayrıca, geliş açısının değişmesiyle dalganın gördüğü yüzey geometrisi farklılaşmakta ve yüzeydeki iletim yolu ve yarıklara bağlı kapasitif ve indüktif etkilerle oluşan elektriksel rezonansın değişmesiyle rezonans frekansında kayma meydana gelmektedir. Bu noktada, Tao tarafından geliştirilen soğurucu yapısında yer alan indüktif etki gösteren iletim yolu uzantılarının ve iki iletim yolu arasında kapasitif etki oluşturulan ayrığın bir halka rezonatör yapısına eklenmesiyle, yüzey üzerindeki elektriksel rezonansın artırıldığı ve bu sayede hem düşük hem de yüksek geliş açılarında yüksek soğurma elde edildiği gözlenmektedir. TM polarizasyonu altındaki ölçümlerde ise farklı geliş açıları altında, TE polarizasyonundaki rezonans frekansından farklı olan 7.1 GHz frekans değerinde sabit fakat farklı oranlarda soğurma elde edilmektedir (Şekil 4.5.b). Burada da TE polarizasyonuna benzer şekilde geliş açısının büyümesiyle birlikte iki metalik yüzey arasında oluşan manyetik rezonansın artması sonucu $\Theta = 60^0$ ve $\Theta = 70^0$ geliş açılarında yüksek soğurma gözlenmektedir. Ancak, özellikle yüzeye dik $\Theta = 0^0$ ve küçük geliş açılarında da soğurma değerinin yükseltilmesi gerekmektedir.

Yönden bağımsız bir soğurucu yapısının, yani hem TE hem de TM polarizasyonu altında aynı veya yakın rezonans frekansında tepki veren ve dalga geliş açısının artması ile soğurma verimi azalmayan bir geliştirilmesi için yapının hem elektriksel hem de manyetik rezonans değerlerinin yükseltilmesi gerekmektedir. Ancak, bu işlemin zorluğu yapı üzerinde her bir ölçünün birbiri ile sinerjik olarak çalışarak tepki vermesinden doğmaktadır. Bu sebeple soğurucu yapısının tasarımı sırasında değiştirilen her bir ölçü parametresi için polarizasyon ve geliş açısı bağımlılığının tekrarlı olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, kapasitif ve indüktif etkileri yükseltilmiş ve dört yönlü simetri özelliği barındıran farklı modeller tasarlanarak alınan numerik analiz sonuçları değerlendirilmiştir.





Şekil 4.6 Tasarlanan farklı soğurucu yapılarına ait soğurma değerleri

Elektriksel ve manyetik rezonans tepkilerin geliştirilmesi amacıyla tasarlanan farklı soğurucu yapıları ve ilgili yapıların hem TE hem de TM polarizasyonu ile $\Theta = 0^0$ ve $\Theta = 70^0$ geliş açılarındaki soğurma değerleri şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şekil 4.6.a'da yer alan yapı ile 2.1 GHz frekans değeri civarında TE polarizasyonu ile $\Theta = 0^0$ geliş açısı altında yaklaşık %94 soğurma oranı ve TM polarizasyonu ile $\Theta = 0^0$ geliş açısı altında yaklaşık %99 soğurma oranı elde edilmiştir. TE polarizasyonunda geliş açısının artması ile soğurma oranı azalarak $\Theta = 70^0$ geliş açısı değerinde %50'nin biraz üzerinde yer alırken, TM polarizasyonu ile aynı soğurma oranı kaybı geliş açısının azalması ile artmakta ancak her iki açı değeri içinde en düşük %94 değerinin üzerinde kalmaktadır. Bu da söz konusu yapının TM polarizasyonu altında geniş geliş açıları altında bile yüksek soğurma gerçekleştirebildiği göstermektedir. Yapı üzerindeki yüzey örüntüsü ile arka metal tabaka arasındaki etkileşim ve oluşan döngüsel akımlar sayesinde söz konusu yapı ile yüksek manyetik rezonans elde edilmesi sağlanmıştır. Ancak yapıya ait yüzey örüntüsü, geniş geliş açılarında yüksek verimle soğurma gerçekleştirmek için yetersiz kalmaktadır.

Şekil 4.6.b'de yer alan soğurucu yapısı ise 5GHz frekans değeri civarında, TE polarizasyonu ve $\Theta = 70^0$ geliş açısı altında %95'in üzerinde bir değerler ile soğurma gerçekleştirmiştir. Diğer ölçüm parametreleri altında ise birbirine yakın rezonans frekansı değerinde ancak %60 soğurma oranı altında değerler elde edilmiştir. Özellikle TM polarizasyonu altında elde edilen soğurma değerleri her iki geliş açısı değeri için de oldukça düşük kalmaktadır. Bu durum, manyetik rezonans sağlayan döngüsel akımların oluşturulması için şekil 4.6 (b)'de yer alan yapının yüzey örüntüsünün şekil 4.6 (a)'da yer alan yapının yüzey örüntüsüne göre yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu yapı ile şekil 4.6 (a)'da yer alan yapı arasındaki en büyük fark ise şekil 4.6 (a)'daki yapı ile her ayrı ölçüm parametresi için farklı frekans değerlerinde en az iki soğurma piki gözlenirken, şekil 4.6 (b)'deki yapı ile 1 GHz ila 4 GHz arasındaki frekans değerlerinde hiçbir soğurma tepkisi gözlenmemiştir.

Şekil 4.6.c'de yer alan soğurucu yapısı ile 2.3 GHz rezonans frekansında hem TE hem TM polarizasyonu altında $\Theta = 0^0$ ve $\Theta = 70^0$ geliş açıları için yüksek soğurma oranları elde edilmiş ancak en düşük soğurma oranı değerinin %70'in üzerine çıkması sağlanamamıştır. Bu yapı ile dış halka rezonatörden merkeze doğru uzanan metal yolların ikinci bir halka rezonatör ile etkileşmesi sağlanarak oluşturulan yeni kapasitif ve indüktif

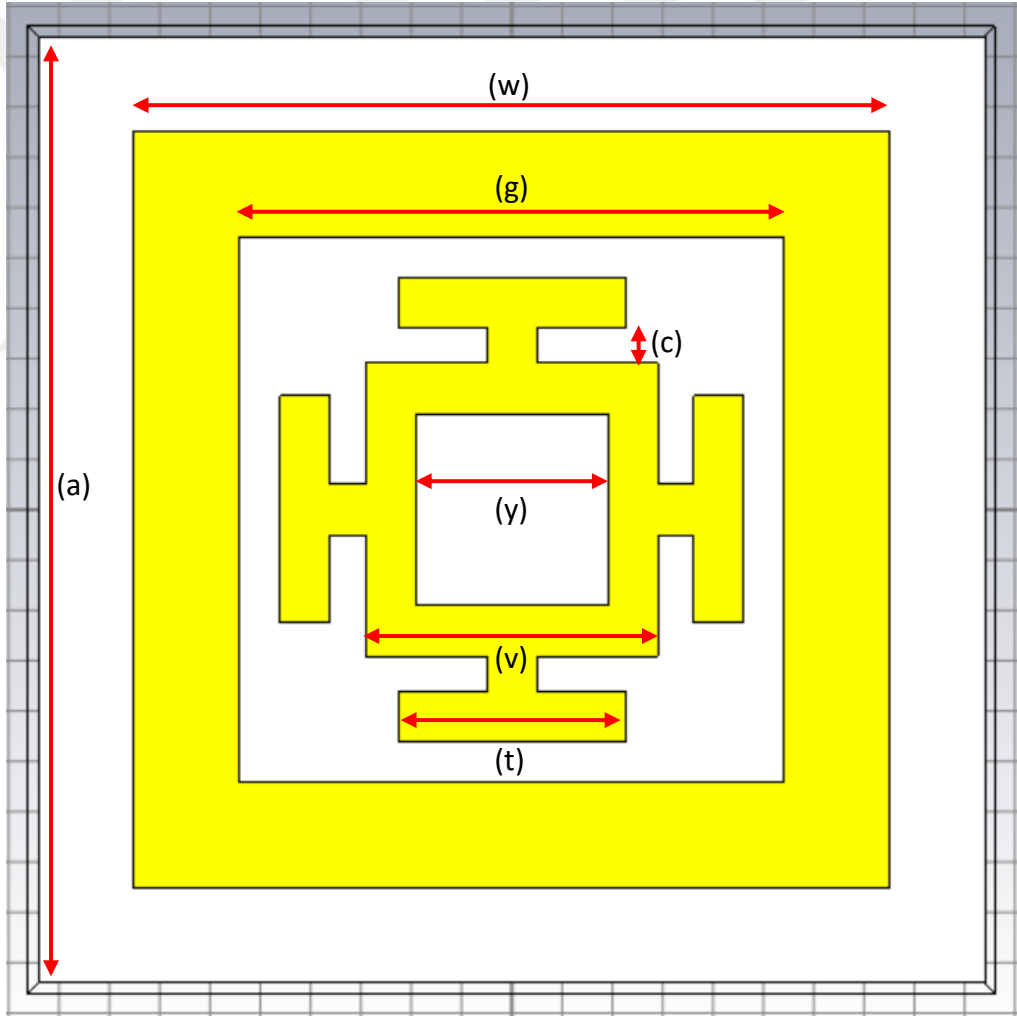
etkileşimler sayesinde toplam soğurma miktarının artırılması ve her iki polarizasyon durumu için eş rezonans frekansında tepki alınması sağlanmıştır. Sonrasında tasarlanan ve şekil 4.6.d’de gösterilen soğurucu yapısı sayesinde hem TE hem TM polarizasyonu altında 2.3 GHz rezonans frekansı çevresinde oluşan yüksek soğurma değerleri gözlenmiş ancak bu tasarım ile de en düşük soğurma oranı %85 değerinin üzerine çıkarılamamıştır. Bununla birlikte şekil 4.6.c ve şekil 4.6.d’de yer alan sonuçların birlikte incelenmesi sonucunda halka rezonatörden uzanan metal yolların dış ve iç halkaya bağlı olmasına bağlı olarak 2-3 GHz frekans değerleri arasında birinci soğurma piki ve 4-6 GHz frekans değerleri arasında ikinci bir soğurma piki oluştuğu görülmüştür.

Mevcut çalışmada geliştirilen son soğurucu yapısı, şekil 4.4 ve şekil 4.6’da yer alan soğurucu yapılarının benzetim ölçümleri ve yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlardan yararlanılarak hem TE hem TM polarizasyonunda yakın rezonans frekansı değerinde tepki vermek ve hem düşük hem de yüksek geliş açısı değerlerinde yüksek oranda soğurma gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır.

4.1 Yönden Bağımsız Metamalzeme Soğurucu Numerik Analizleri

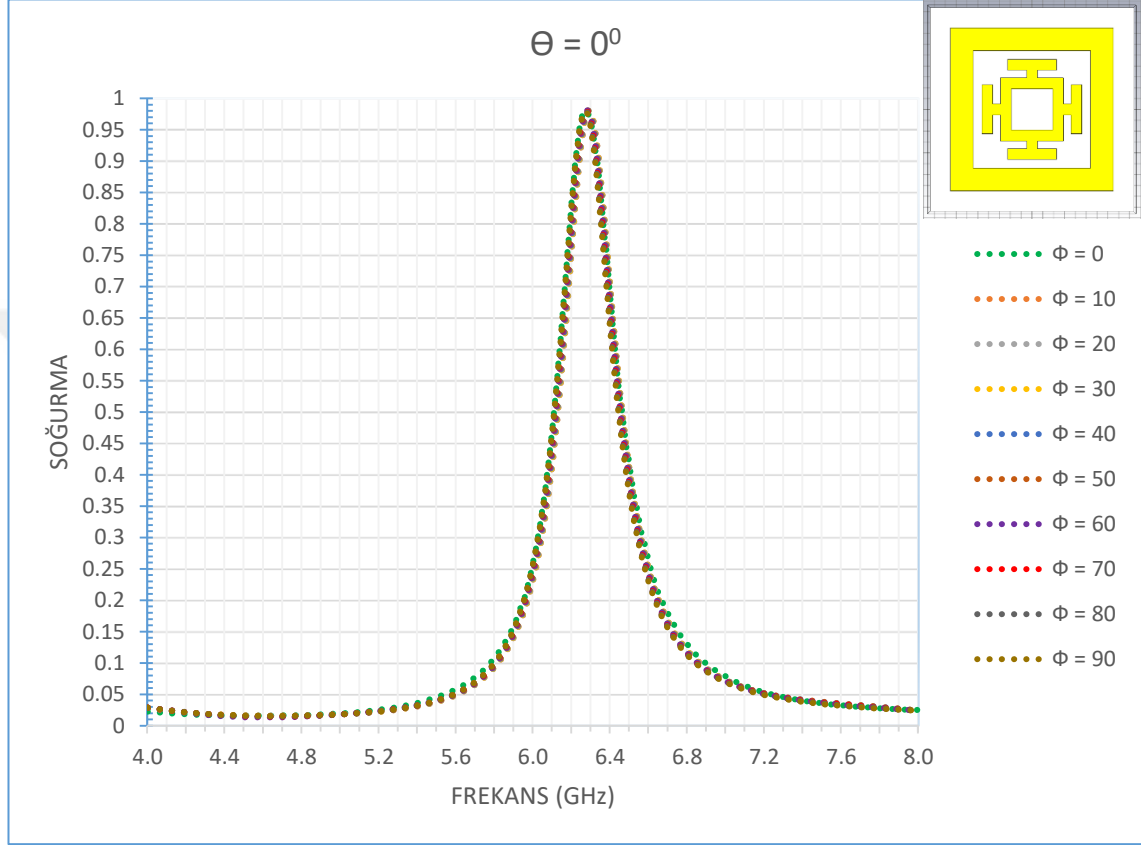
Mevcut çalışmada geliştirilen özgün soğurucu yapısında, şekil 4.6 (b)’de yer alan soğurucu tasarımı ve ilgili şekildeki yüzey örüntüsüne sahip soğurucu birim hücrelerinin periyodik olarak x ve y ekseninde dizilmesiyle oluşan bir yüzeyde, hücreler arasında oluşan doğrudan etkileşimin engellenmesi ve yapının orijinal çalışma frekansında gözlenen soğurma değerlerinin güçlendirilmesi için eş rezonans frekanslarında tepki veren bir halka rezonatör kullanılmıştır. Dielektrik alttaş malzemesi olarak seçilen FR4 malzemeye ait elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon = 4.3$ ve dielektrik kayıp değeri $\tan(\delta) = \epsilon_2/\epsilon_1 = 0.025$ iken ön ve arka yüzeyde yer alan iletken tabakalar için seçilen bakırın frekanstan bağımsız elektriksel iletkenlik değeri $\sigma = 5.8 \times 10^7$ (S/m) olarak belirlenmiştir. Yapının arka yüzeyinin tamamen bakır kaplı olması nedeniyle dalga iletiminin sıfıra indirgenmesi sağlanarak soğurma oranının yalnızca yansıma katsayısı değerleri ile belirlenmesi sağlanmıştır. İlk olarak, polarizasyondan bağımsızlığın tespit edilmesi için $\Phi = 0^0$ ile $\Phi = 90^0$ polarizasyon açıları arasında yapının soğurma oranları benzetim yöntemi ile ölçülmüştür. Sonrasında, sırasıyla TE polarizasyonu ve TM polarizasyonu ile yapının $\Theta = 0^0$ ila $\Theta = 70^0$ arasında değişen farklı dalga geliş açıları altında gösterdiği soğurma oranları yine benzetim yöntemi vasıtasıyla ölçülmüştür. Numerik analizler,

sonlu integral yöntemi kullanan CST Microwave Studio isimli ticari yazılımı vasıtasıyla, periyodik sınır koşulları uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Tuong_20). Numerik analizlerin gerçekleştirilmesi için benzetim işlemine ait özelliklerin belirlenmesinde “Floquet Port” uyarım ayarları, tek bir birim hücre yapısının x ve y eksenini doğrultusunda periyodik olarak dizilerek sonsuz bir düzlem oluşturmaya yönelik olarak seçilmekte ve elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusu z eksenini olarak belirlenmiştir. Yapı üzerindeki geometrik örüntüye ait parametrelerin değiştirilerek alınan farklı ölçümler sonucunda yapının en stabil ve en yüksek soğurma değerlerini veren optimum ölçümleri belirlenmiştir.



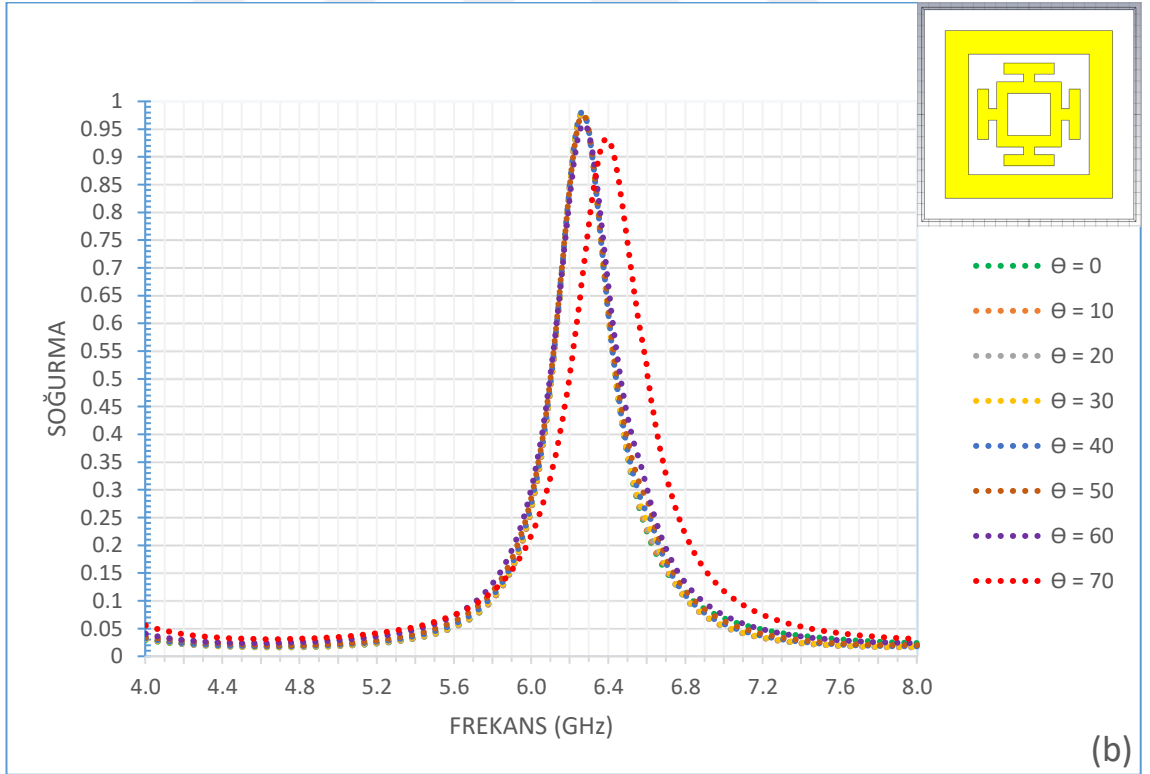
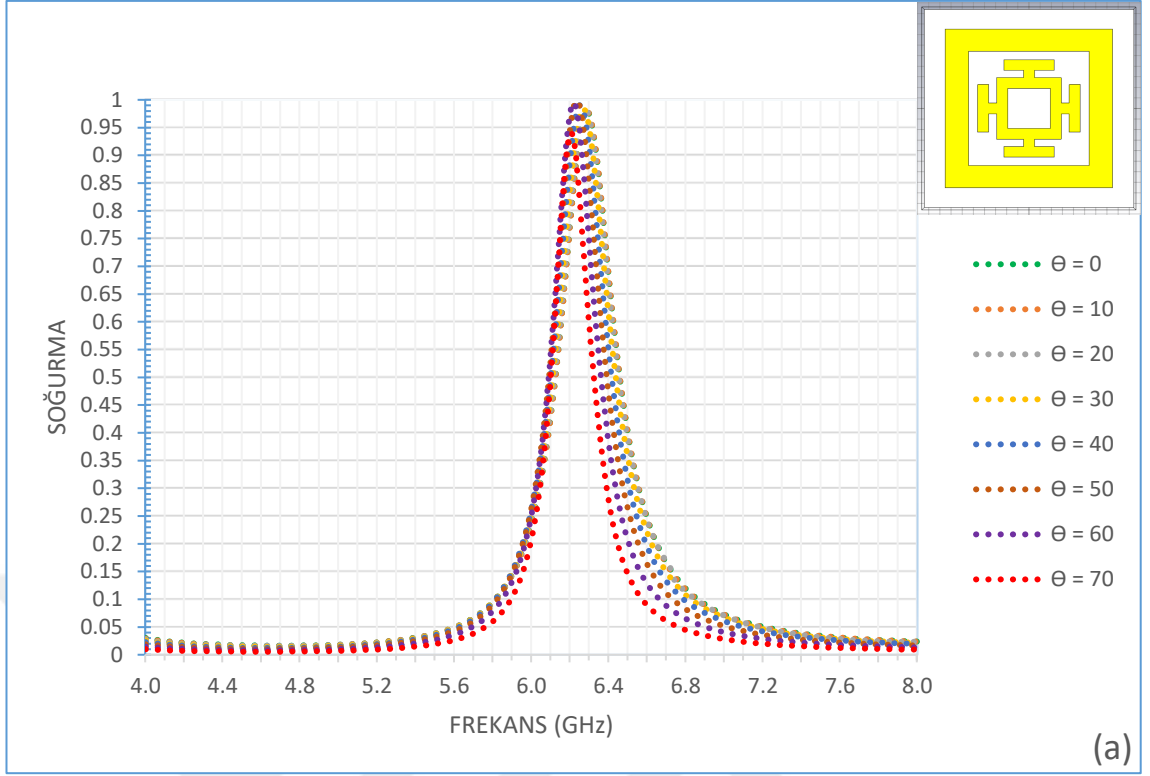
Şekil 4.7 GHz mertebesinde tepki vermek üzere modellenen birim hücre yapısının önden görünümü. Boyutlar: $a = 18.75$ mm, $w = 15$ mm, $g = 10.8$ mm, $v = 5.8$ mm, $y = 3.8$ mm, $t = 4.5$ mm, $c = 0.7$ mm

Şekil 4.7’de gösterilen, modellenen birim hücre yapısı ölçüleri GHz frekans değerlerinde çalışmak üzere belirlenmiş ve dielektrik tabaka kalınlığı mevcut FR4 kart ölçülerine uygun olarak $s = 1.6$ mm; bakır tabaka kalınlığı ise $z = 0.035$ mm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.8 Mevcut çalışmada geliştirilen soğurucu yapısının, yüzeye dik ve farklı polarizasyon açılarındaki gelen dalgayı soğurma değerleri

Şekil 4.8’de z ekseninde yüzeye dik $\Theta = 0^\circ$ ve değişken polarizasyon açıları ile gönderilen elektromanyetik dalganın geliştirilen yapı üzerindeki soğurma oranları gösterilmektedir. Söz konusu soğurucu yapısı, dört yönlü simetrik özellikte yüzey örüntüsüne sahip olması sonucunda $\Phi = 0^\circ$ ’den $\Phi = 90^\circ$ ’ye kadar tüm polarizasyon açıları altında, 6.28 GHz frekans değerinde %98 oranında soğurma gerçekleştirmektedir. Böylece, geliştirilen yapı ile elektromanyetik dalganın polarizasyon açısından bağımsız yüksek oranlı soğurma elde edilmiştir.

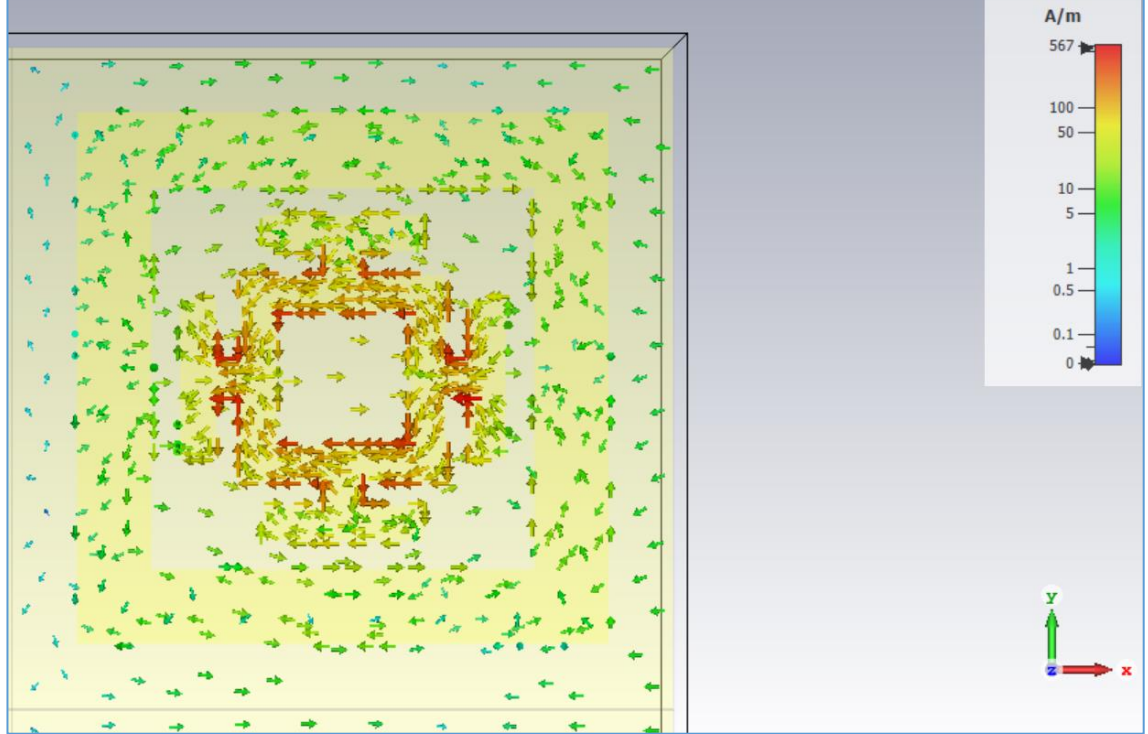
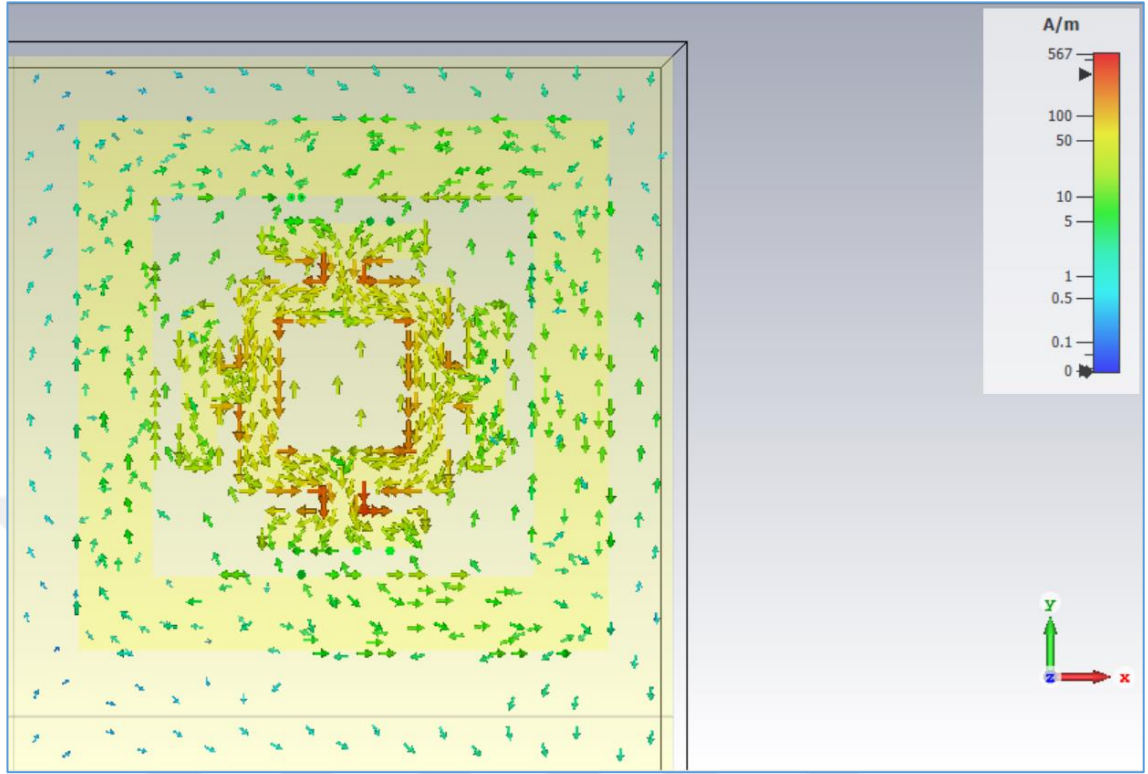


Şekil 4.9 Mevcut çalışmada geliştirilen soğurucu yapısının, TE (a) ve TM (b) polarizasyonunda, farklı geliş açıları altında soğurma değerleri

Sonraki ölçümlerde söz konusu yapı TE ve TM polarizasyonlarındaki dalgalar için ayrı ayrı olarak farklı geliş açısı değerleri altında testlere tabi tutularak yapının geliş açısı hassasiyeti belirlenmektedir.

Şekil 4.9.a ve şekil 4.9.b’de geliştirilen soğurucu yapısının sırasıyla TE ve TM polarizasyonunda $\Theta = 0^0$ ila $\Theta = 70^0$ arasında değişen geliş açıları ile gönderilen elektromanyetik dalgayı soğurma oranları yer almaktadır. Söz konusu yapının hem TE hem de TM frekansı altında oldukça yakın rezonans frekanslarında, yüksek oranlı soğurma gerçekleştirildiği görülmüştür. TE polarizasyonu altında 6.28 GHz frekans değerinde, $\Theta = 0^0$ ’den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %93’ün üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ ’den $\Theta = 60^0$ ’ye kadar olan aralığında ise söz konusu yapı %98’in üzerinde sabit soğurma değeri göstermiştir. TM polarizasyonu altında da benzer şekilde $\Theta = 0^0$ ’den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %93’ün üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ ’den $\Theta = 60^0$ ’ye kadar olan aralığında ise söz konusu yapı ile %96’nın üzerinde sabit soğurma değeri elde edilmiştir. TE polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekansında %0,32 oranında bir kayma gözlenirken, TM polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekans değerinde %0,37 oranında kayma olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.10’da rezonans TE ve TM modundaki rezonans frekansı değerindeki yüzey akımları gösterilmiştir. Yapı yüzeyindeki geometrik örüntüye ait ölçü parametreleri değiştirilerek yapılan farklı numerik analizler sonucunda, şekil 4.7’de verilen c ve t parametrelerinin değiştirilmesi ile özellikle TE modundaki soğurma oranı değerlerinin değiştiği gözlenmiştir. Yapı üzerindeki v parametresinin değiştirilmesiyle rezonans frekansındaki kayma kontrol edilirken, y parametresi özellikle TM modu başta olmak üzere soğurma oranını etkilemektedir. Yapı üzerindeki diğer parametreler ise hem TE hem de TM modundaki rezonans frekanslarının kayma oranını, diğer bir deyişle geliş açısı değerleri altında soğurma frekansı stabilitesini sağlamaktadır.



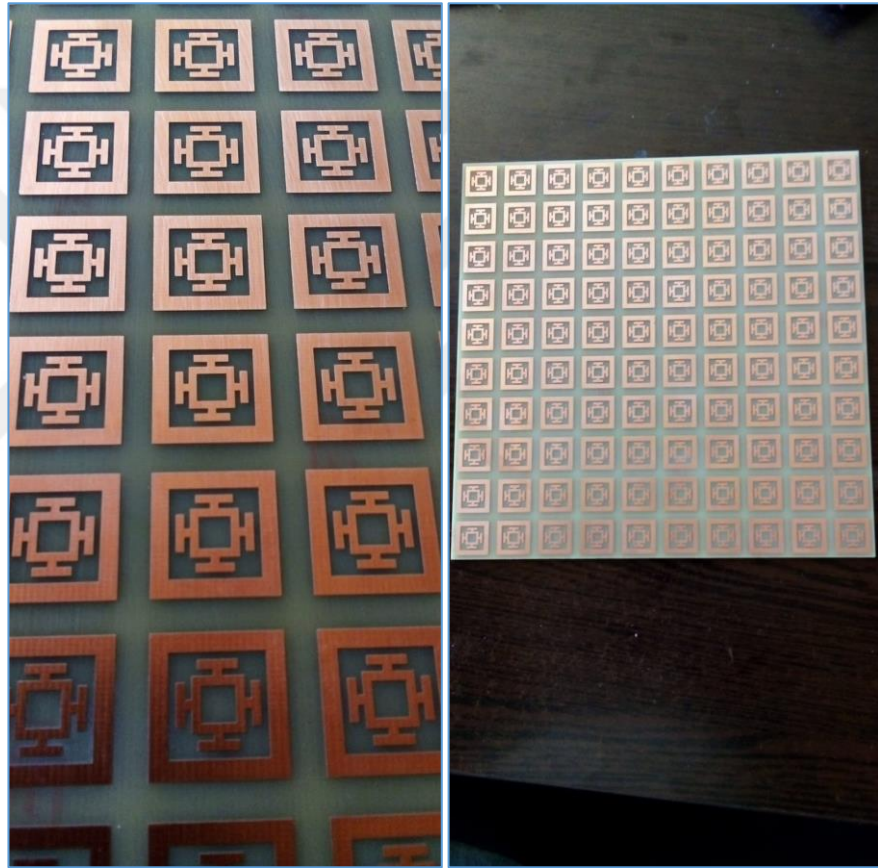
Şekil 4.10 Rezonans frekansı değerinde sırasıyla TE ve TM modunda yapı üzerindeki yüzey akımları

Geliştirilen özgün soğurucu yapısı sayesinde, TE ve TM polarizasyonu altında oldukça yakın rezonans frekans değerlerinde tepki veren ve hem TE hem de TM polarizasyonu ve $\Theta = 0^0$ ila $\Theta = 70^0$ arasında değişen geniş geliş açısı aralığı altında yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Böylece, yapılan numerik analizler sonucu elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapının hem polarizasyondan hem de dalga geliş açısında bağımsız olarak yüksek oranda soğurma gerçekleştirdiği görülmüştür.



5. ÜRETİM AŞAMASI VE DENEYSEL ÖLÇÜMLER

Deneysel ölçümlerin alınması için şekil 4.7’de yer alan soğurucu yapısı, 10 x 10 adet birim hücrenin periyodik dizilimiyle oluşan toplamda 18.75mm x 18.75 mm ölçülerine sahip, iki yüzü bakır kaplı FR4 kart üzerinde şekillendirilmiştir. Geliştirilen yüzey örüntüsü çift taraflı bakır kaplı FR4 kartın tek yüzüne fotolitografi tekniği kullanılarak baskılanmıştır (Şekil 5.1).

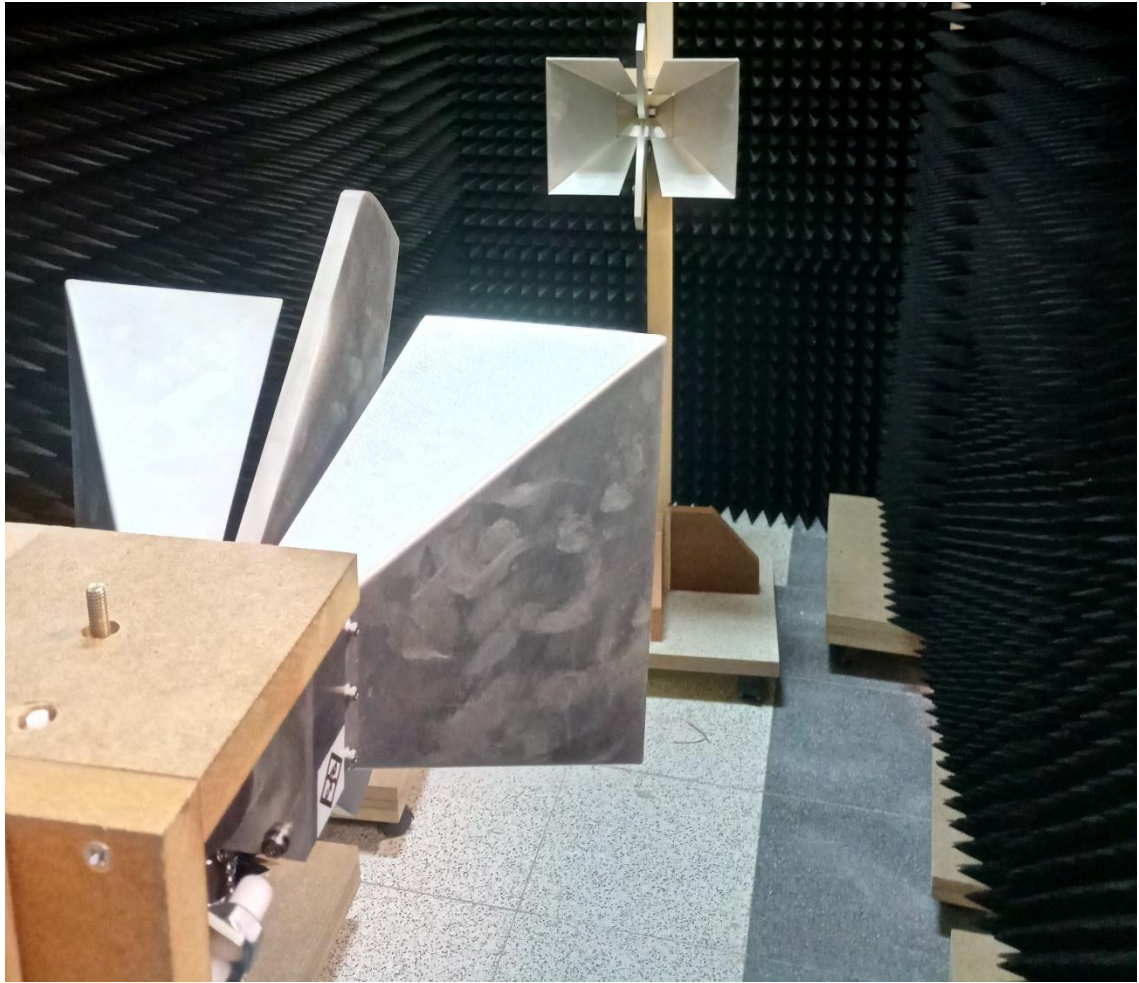


Şekil 5.1 Periyodik soğurucu yapılarını içeren prototip kartın görünümü

Baskı işlemi için söz konusu geometrik örüntü 10 x 10 adet olarak bir asetat kağıdı üzerine basılmıştır. Sonrasında sıcak pres ile tek yüzeyi fotorezistif film kaplanan kart ile baskılı asetat kağıdı morötesi lambalar içeren elektronik devre kartı pozlama cihazı içerisinde bekletilerek baskılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kart üzerinde kalan film parçalarının temizlenmesi için ise üretilen kart güvenli bir ortamda çözücü kimyasallar içerisinde

bekletilerek periyodik soğurucu yapılarından oluşan prototip kartın üretim işlemi tamamlanmıştır. Son olarak bilgisayar numerik kontrollü tezgah (CNC) yardımıyla kartın 18.75 mm x 18.75 nihai ölçülerinde pürüzsüz olarak kesilmesi sağlanmıştır.

Üretilen prototip soğurucu kartının deneysel soğurma değerlerinin ölçülmesi için Ankara Üniversitesi Gölbaşı yerleşkesinde yer alan mikrodalga karakterizasyon laboratuvarı kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Pasif soğurucular ve horn antenleri içeren yarı yankısız oda görünümü

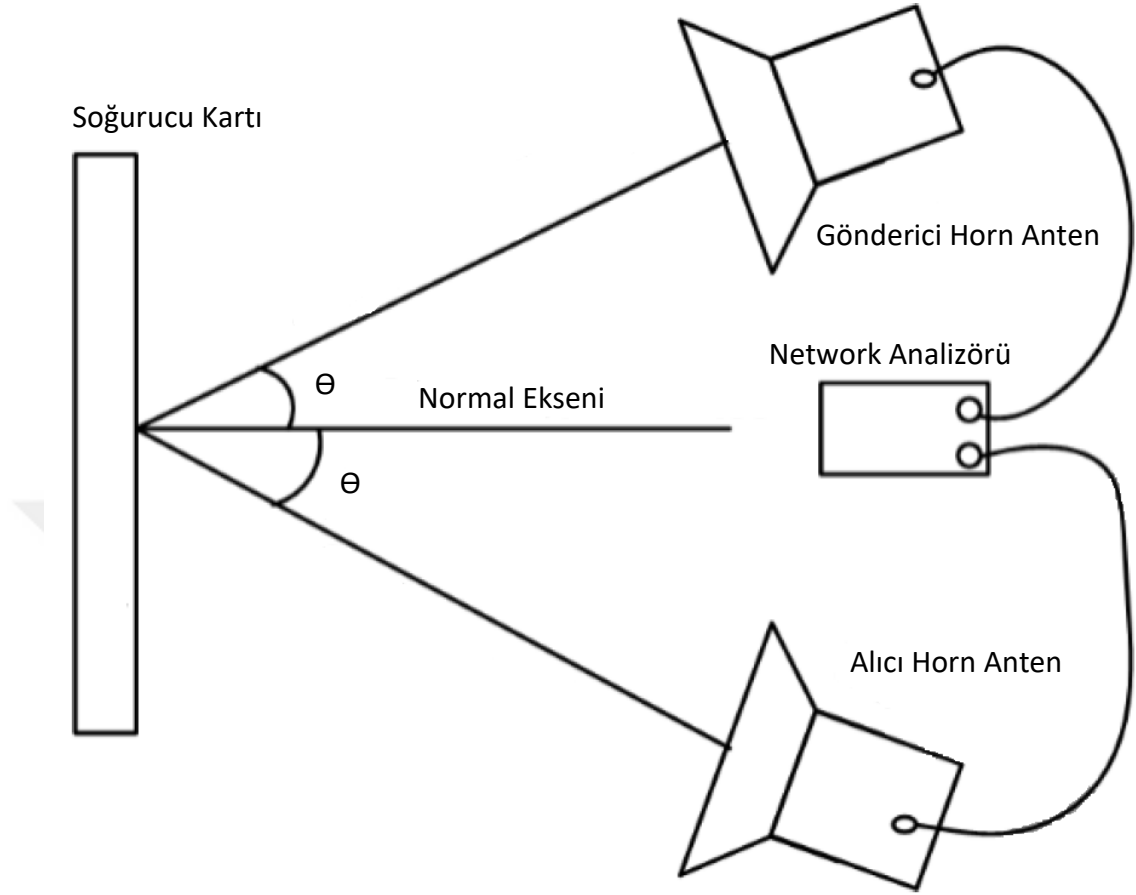
Laboratuvar içerisinde pasif soğurucular kullanılarak yarı yankısız bir test odası oluşturulmuş ve elektromanyetik dalgaların gönderilmesi alınması için horn antenler kullanılmıştır (Şekil 5.2). Sinyal üretimi ve deneysel saçılma parametrelerin elde edilmesi için 9 kHz ila 13.6 GHz frekans değerleri arasında sinyal ölçümü sağlayan Rohde &

Schwarz Network Analizörü kullanılmıştır (Şekil 5.3). Network analizörü üzerindeki birinci ve ikinci port çıkışlarına bağlanan horn antenler vasıtasıyla soğurucu kartı üzerine gönderilen ve alınan dalgaların network analizörü tarafından okunması ile dalganın yansımaya katsayısını belirleyen S_{11} parametrelerinin elde edilmesi sağlanmıştır.



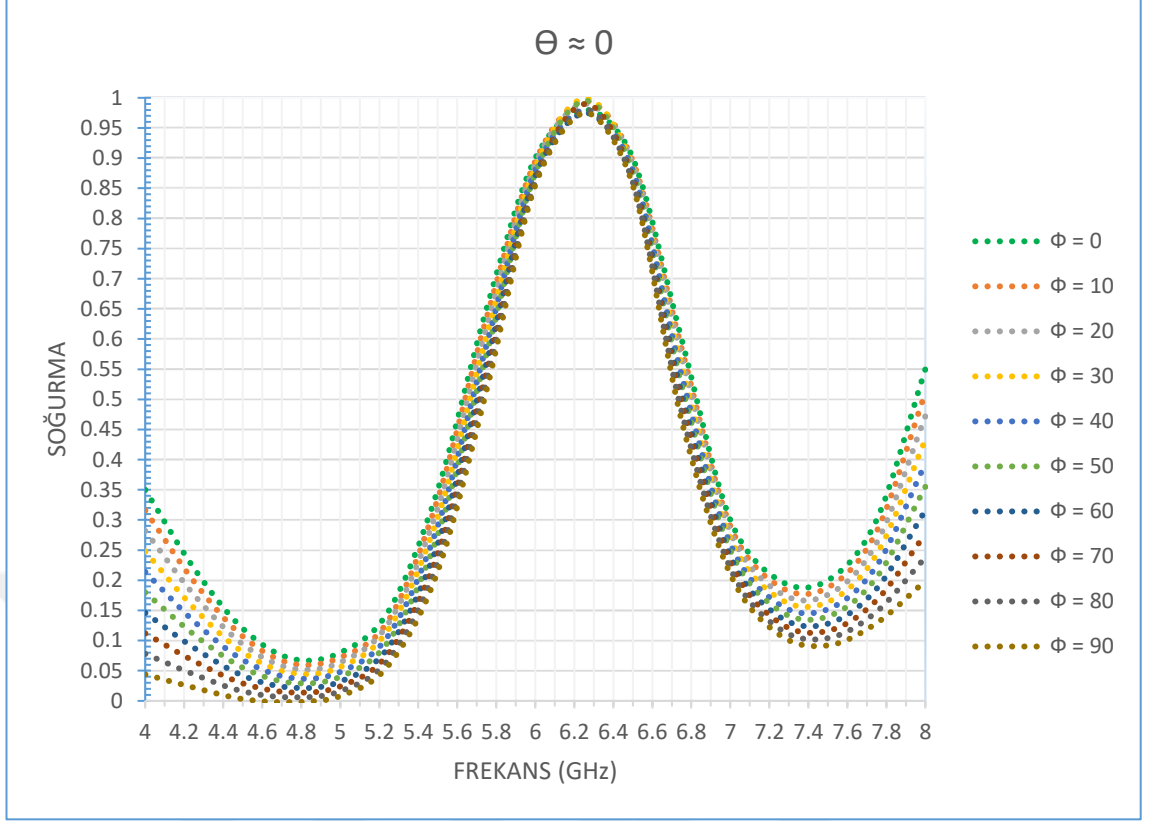
Şekil 5.3 Deneysel saçılma parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan network analizörü

Ölçüm öncesinde oluşturulan yankısız odanın üst açıklığı da pasif soğurucular ile kaplanarak içerisinde soğurucu kartı yer almadan bir referans ölçümü alınmıştır. Buradaki amaç çevredeki elektronik aletlerden yayımlanan gürültü sinyalleri ve oluşturulan yankısız odanın sinyal geçişini engellemedeki yetersizliği göz önünde bulundurularak alınacak ölçümlerde ne kadar düzeyde bir hata payı olacağının belirlenmesidir. Referans ölçümleri kaydedildikten sonra soğurucu kartı horn antenlerin karşısına şekil 5.4'teki gibi yerleştirilmiştir.



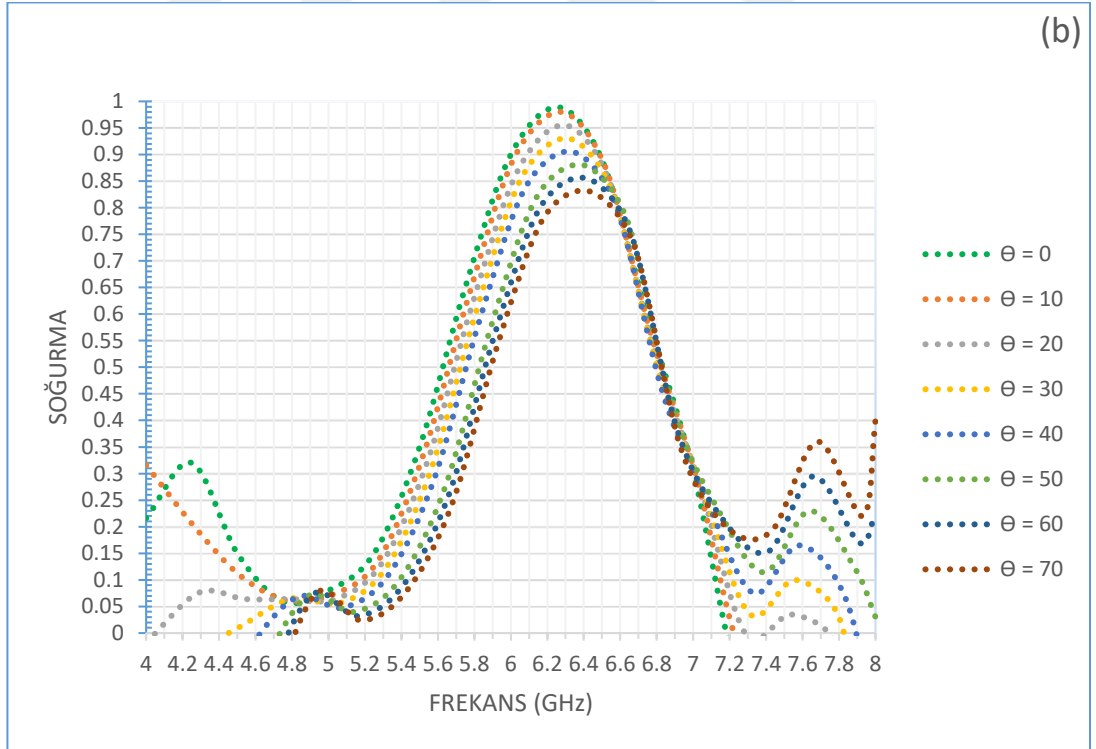
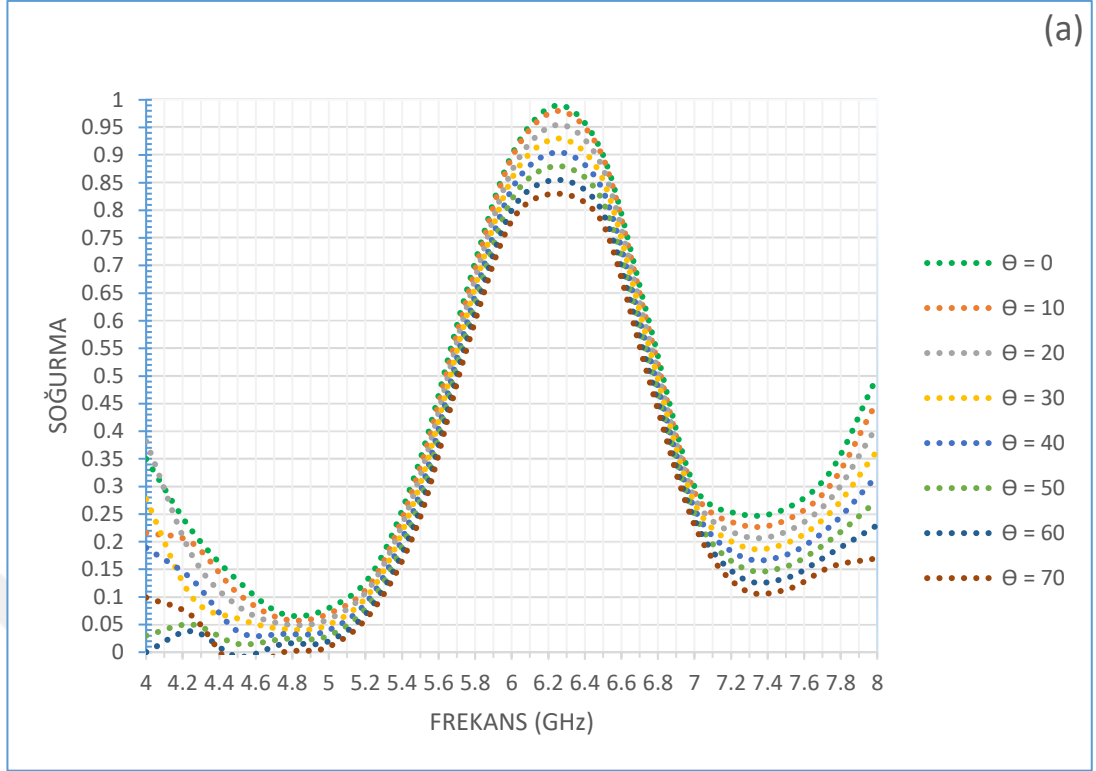
Şekil 5.4 Yansıma parametreleri ölçüm sisteminin kuruluş planı (Thummaluru vd. 2019'dan değiştirilerek alınmıştır)

Prototip soğurucu kartı ve horn antenler şekil 5.4'teki gibi konumlandırılarak gönderici anten ile istenilen geliş açısı θ değeriyle numune üzerine gönderilen elektromanyetik dalganın alıcı anten ile algılanması sağlanarak soğurma kartından yansıyan dalgalara ait saçılma parametrelerinin ölçülmesi sağlanmıştır. Yüksek geliş açısı değerleri altındaki ölçümler için horn antenler arasındaki mesafe artırılarak tekrarlı ölçümler alınmıştır. Farklı polarizasyon açılarında ölçümler ise horn antenlerin birbirine yaklaştırılarak yansıma ölçümü alınmasına izin verecek şekilde, en düşük geliş açısı θ değeriyle konumlandırılması sağlanarak soğurucu kartın konumu değiştirilmeden, normale dik eksende Φ açısıyla döndürülmesi yoluyla elde edilmiştir.



Şekil 5.5 Üretilen yapının farklı polarizasyon açıları altında deneysel olarak ölçülen soğurma değerleri

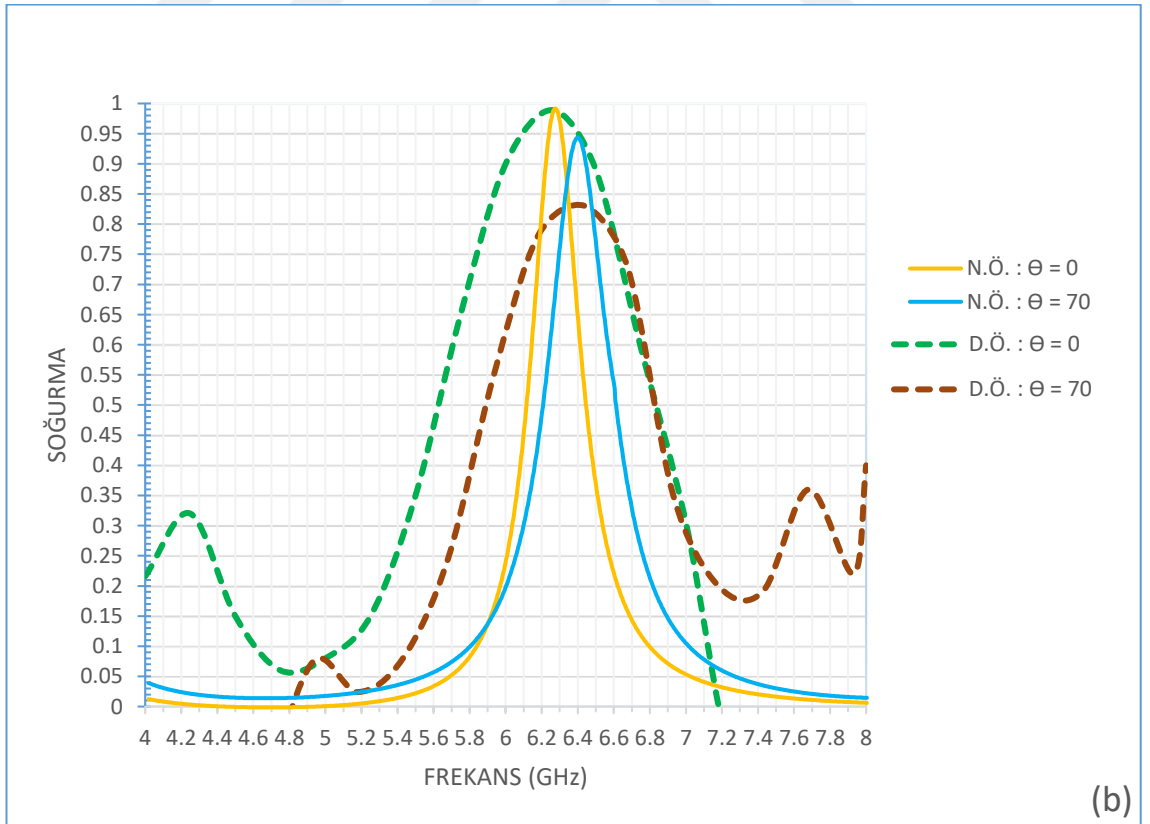
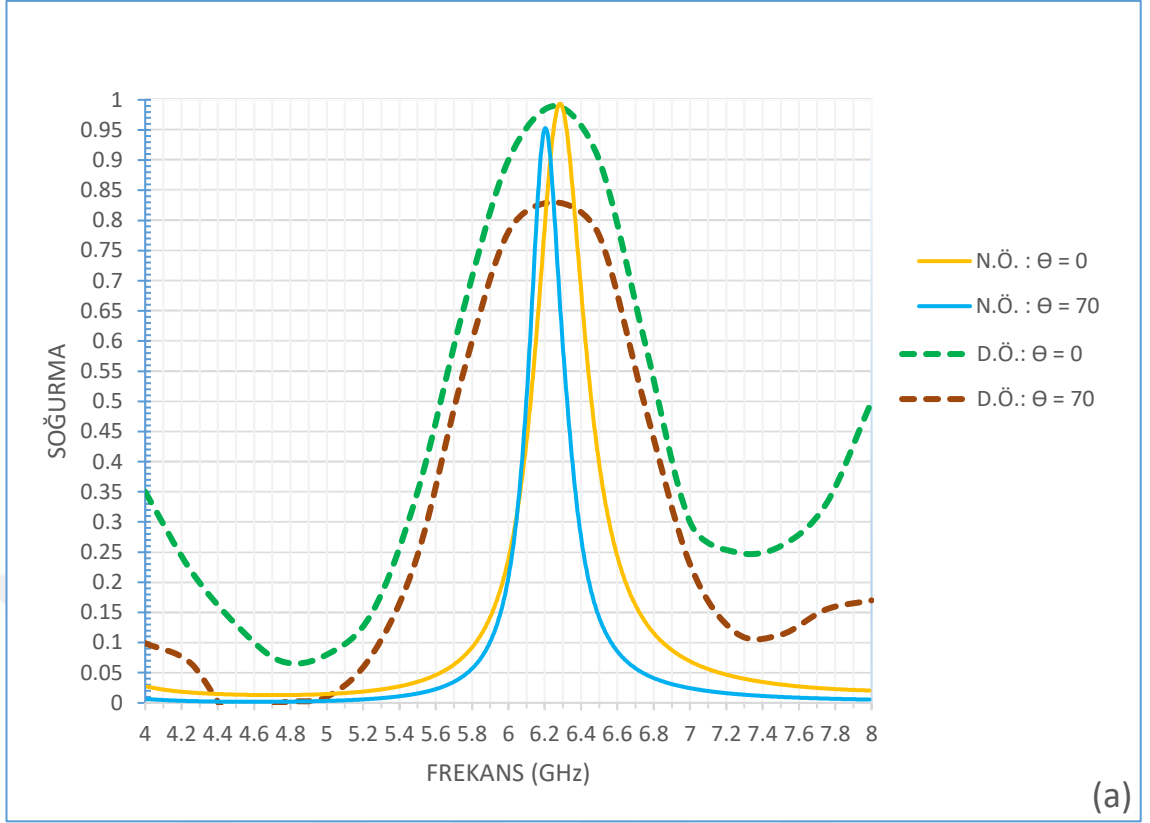
Şekil 5.5'te z ekseni üzerinde yüzeye dik $\Theta = 0^0$ ve değişken polarizasyon açıları ile gönderilen elektromanyetik dalganın geliştirilen yapı üzerindeki soğurma oranları gösterilmemektedir. Söz konusu soğurucu yapısı, dört yönlü simetrik özellikte yüzey örüntüsüne sahip olması sonucunda $\Phi = 0^0$ 'den $\Phi = 90^0$ 'ye kadar tüm polarizasyon açıları altında, 6.28 GHz frekans değerinde %99 oranında soğurma gerçekleştirmektedir.



Şekil 5.6 Üretilen yapının TE (a) ve TM (b) polarizasyonundaki farklı geliş açıları altında deneysel olarak ölçülen soğurma değerleri

Şekil 5.5'te z eksenini üzerinde yüzeye dik $\Theta = 0^0$ ve değişken polarizasyon açıları ile gönderilen elektromanyetik dalganın geliştirilen yapı üzerindeki soğurma oranları gösterilmemektedir. Söz konusu soğurucu yapısı, dört yönlü simetrik özellikte yüzey örüntüsüne sahip olması sonucunda $\Phi = 0^0$ 'den $\Phi = 90^0$ 'ye kadar tüm polarizasyon açıları altında, 6.28 GHz frekans değerinde %99 oranında soğurma gerçekleştirilmektedir.

Şekil 5.6.a'da TE polarizasyonu altında 6.28 GHz frekans değerinde, $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %80'in üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 60^0$ 'ye kadar olan aralığında ise söz konusu yapı %85'in üzerinde sabit soğurma değeri göstermiştir. Şekil 5.6.b'de de TM polarizasyonu altında benzer şekilde $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %80'in üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 60^0$ 'ye kadar olan aralığında ise söz konusu yapı ile %85'in üzerinde sabit soğurma değeri elde edilmiştir. TE polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekansındaki kayma önemsenmeyecek kadar düşük, TM polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekans değerinde %0,4 oranında kayma olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.7 Üretilen yapının TE (a) ve TM (b) polarizasyonundaki farklı geliş açıları altında numerik ve deneysel soğurma ölçümleri kıyaslaması

Elde edilen bu deneysel ölçümler sonuçlarının numerik analiz sonuçlarıyla kıyaslanması sonucunda, geliştirilen soğurucu yapısını içeren numunenin deneysel olarak ölçülen soğurma değerlerinin numerik analizler ile elde edilen soğurma değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.7). Özellikle farklı polarizasyon açıları altındaki ölçüm sonuçları ve görülen toplam rezonans frekansı kayması değerleri oldukça başarılı bir şekilde elde edilmiş ancak her iki polarizasyon modunda da geliş açısının artması ile soğurma verimindeki azalma oranı numerik analizlere göre yüksek olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi, çevredeki elektronik cihazların yayımladığı gürültü sinyalleri, oluşturulan yansıma odasının sinyal engellemedeki yetersizliği, üretim sırasında oluşan yapısal kusur veya hatalar olabilmektedir. Bununla birlikte, soğurma oranında görülen kayba neden olan en önemli faktörün, soğurucu prototip kartın 10 x 10 soğurucu hücre içeren ve toplamda 18.75 mm x 18.75 mm olan göreceli olarak küçük boyutlarda üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle anten boyutuna bağlı olarak daha fazla sayıda soğurucu hücre içeren, daha geniş yüzey alanına sahip bir soğurucu yapı numunesi üretilmesinin, daha verimli deneysel sonuçların elde edilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

6. SONUÇ

Literatürde yer alan ve günümüze kadar geliştirilen, polarizasyon ve geliş açısından bağımsız soğurma gerçekleştiren yapılar incelenerek aynı frekans değerinde hem TE hem TM polarizasyonu ve farklı dalga geliş açıları altında yüksek oranlı soğurma gerçekleştiren bir yönden bağımsız soğurucu yapısı geliştirilmiştir. Soğurucu yapısının özgün yüzey örüntüsü sayesinde, benzetim yöntemi ile yapılan analizler sonucunda $\Phi = 0^0$ 'den $\Phi = 90^0$ 'ye kadar tüm polarizasyon açıları altında, 6.28 GHz frekans değerinde %98 oranında soğurma gerçekleştirmektedir. Böylece, geliştirilen yapı ile elektromanyetik dalganın polarizasyon açısından bağımsız yüksek oranlı soğurma elde edilmiştir. Geliştirilen soğurucu yapısının TE ve TM polarizasyonunda $\Theta = 0^0$ ila $\Theta = 70^0$ arasında değişen geliş açıları ile gönderilen elektromanyetik dalgayı soğurma oranları yer almaktadır. Söz konusu yapının hem TE hem de TM frekansı altında oldukça yakın rezonans frekanslarında, yüksek oranlı soğurma gerçekleştirildiği görülmüştür. TE polarizasyonu altında 6.28 GHz frekans değerinde, $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %93'ün üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 60^0$ 'ye kadar olan aralığında ise söz konusu yapı %98'in üzerinde sabit soğurma değeri göstermiştir. TM polarizasyonu altında da benzer şekilde $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %93'ün üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 60^0$ 'ye kadar olan aralığında ise söz konusu yapı ile %96'nın üzerinde sabit soğurma değeri elde edilmiştir. TE polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekansında %0,32 oranında bir kayma gözlenirken, TM polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekans değerinde %0,37 oranında kayma olduğu gözlenmiştir.

Geliştirilen soğurucu hücrelerinden 10 x 10 adet içeren ve toplamda 18.75 mm x 18.75 mm boyutlarında olan bir soğurucu numunesi üretilerek yarı yankısız ortamda alınan ölçümler sonucunda $\Phi = 0^0$ 'den $\Phi = 90^0$ 'ye kadar tüm polarizasyon açıları altında, 6.28 GHz frekans değerinde %99 oranında soğurma gerçekleştirmektedir. TE polarizasyonu altında 6.28 GHz frekans değerinde, $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %80'in üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 60^0$ 'ye kadar olan aralığında ise söz konusu yapı %85'in üzerinde sabit soğurma değeri göstermiştir. TM polarizasyonu altında da benzer şekilde $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 70^0$ geliş açısına kadar %80'in üzerinde yüksek soğurma oranı elde edilmiştir. Geliş açısının $\Theta = 0^0$ 'den $\Theta = 60^0$ 'ye kadar

olan aralığında ise söz konusu yapı ile %85'nin üzerinde sabit soğurma değeri elde edilmiştir. TE polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekansındaki kayma önemsenmeyecek kadar düşük, TM polarizasyonu altında değişen geliş açısıyla rezonans frekans değerinde %0,4 oranında kayma olduğu gözlenmiştir. Numerik ve deneysel ölçümler arasındaki farkların nedeni, çevredeki elektronik cihazların yayımladığı gürültü sinyalleri, oluşturulan yansıma odasının sinyal engellemedeki yetersizliği, üretim sırasında oluşan yapısal kusur veya hatalar olabilmektedir.

Elde edilen bu deneysel ölçümler sonuçlarının numerik analiz sonuçlarıyla kıyaslanması sonucunda, geliştirilen soğurucu yapısını içeren numunenin deneysel olarak ölçülen soğurma değerlerinin numerik analizler ile elde edilen soğurma değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmiş ve hem polarizasyondan hem de dalga geliş açısında bağımsız olarak yüksek oranda soğurma gösteren bir yönden bağımsız soğurucu elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aydın K., Ferry V. E., Briggs R. M., Atwater H. A. 2011. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers.
- Baskey H. B., Akhtar M. J., Dixit A. K., Shami T. C. 2015. Electromagn Waves Appl, 29, 2479.
- Costa F., Monorchio A., Manara G. 2010. Analysis and design of ultrathin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces, IEEE Trans. Antennas Propag. 58, 1551.
- Gong M.X., Hart B., Mao S. 2008. Advanced Wireless LAN Technologies: IEEE 802.11ac and Beyond.
- Emerson W. H. 1973, IEEE Trans. Ant. Prop., AP21, 484.
- Fujishiro Y. 2012. Taking Advantage of S-Parameters. TDK EMC Technology.
- Jen Y. J., Lee C. C., Lu K. H., Jheng C. Y., Chen Y. J. 2015. Fabry-Perot based metal-dielectric multilayered filters and metamaterials.
- Jen Y. J., Lkhtakia A., Lin M. J., Wang W. H., Wu H. M., Liao H. S. 2013. Metal/dielectric/metal sandwich film for broadband reflection reduction. Sci. Rep. 3, 1672.
- Ke L., Xin Z., Xinyu H., Peng Z. 2011. Analysis and Design of Multilayer Jaumann Absorbers.
- Khuyen B. X., Tung B. S., Dung N. V., Yoo Y. J., Kim Y. J. Kim K. W., Lam V. D., Yang J. G., Lee Y. P. 2015. Size-efficient metamaterial absorber at low frequencies: design, fabrication, and characterization.
- Kock W. E. 1948. Bell Syst. Tech. J. 27, 58.
- Knott E., Shaeffer J. F., Tuley M. T. 2004 Radar Cross Section, 2 nd ed., Scitech, Raleigh.
- Landy N. I., Bingham C. M., Tyler T., Jokerst N., Smith D. R., Padilla W. J. 2009. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging. PHYSICAL REVIEW B 79, 125104.
- Landy N. I., Sajuyigbe S., Mock J. J., Smith D. R., Padilla W. J. 2008. Perfect Metamaterial Absorber. Phys. Rev. Lett. 100, 207402.
- Landy N. I. ve Smith D. R. 2013. A full-parameter unidirectional metamaterial cloak for microwaves. Nat. mater. 12, 25.

- Lee D., Hwang J. G., Lim D., Hara T., Lim S. 2016. Incident Angle- and Polarization-Insensitive Metamaterial Absorber using Circular Sectors.
- Li. H. M., Liu S. B., Liu S. Y., Wang S. Y., Zhang H. F., Bian B. R., Kong X. K. 2015. Electromagnetically induced transparency with large delay-bandwidth product induced by magnetic resonance near field coupling to electric resonance. *Appl. Phys. Lett.* 106, 114101.
- Liu R., Cui T. J., Huang D., Zhao B., Smith D. R. 2007. Description and explanation of electromagnetic behaviors in artificial metamaterials based on effective medium theory. *PHYSICAL REVIEW E* 76, 026606.
- Liu Y., Zhang X. 2011. Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chem. Soc. Rev.* 40, 2494-2507.
- Luukkonen O., Costa F., Simovski C. R., Monorchio A., Tratyakov S. A. 2009. A Thin Electromagnetic Absorber for Wide Incidence Angles and Both Polarizations. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 57, NO. 10.*
- Munk B. A. 2000. *Frequency Selective Surfaces*, John Wiley & Sons, New York.
- Ostafte H. 2012. RF-based Wireless Charging and Energy Harvesting Enables New Applications and Improves Product Design.
- Padilla W. J., Taylor A. J., Highstrete C., Lee M., Averitt R. D. 2006. Dynamical Electric and Magnetic Metamaterial Response at Terahertz Frequencies. *PRL* 96, 107401.
- Planck M. 1901. Uber das Gestz der energieverteilung im normalspektrum, *Ann. Phys. (Leipzig)* 309, 553.
- Ruck G. T., Barrick D. E., Stuart W. D., 1970. *Radar Cross Section Handbook*, Vol. 2, Plenum, New York.
- Salisbury W. W. 1952. US Patent 2599944.
- Sharma S. K., Ghosh S., Srivastava K. V., Shukla A. 2017. *Microwave Opt Technol Lett*, 59.
- Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat Nasser S. C., Schultz S. 2000. *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184.
- Smith D. R. ve Pendry J. B. 2006. *J. Opt. Soc. Am. B* 23, 391.
- Sun J., Shalaev M. I., Litchinitser N. M. 2015. Experimental demonstration of a non-resonant hyperlens in the visible spectral range. *Nat. Commun.* 6, 7201.

- Wang G. D., Chen J. F., Hu X., Chen Z. Q., Liu M. 2014. Progress Electromagn Res, 145, 175.
- Smith D. R., Vier D. C., Koschny Th., Soukoulis C. M. 2005. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. PHYSICAL REVIEW E 71, 036617.
- Tao H., Bingham C. M., Strikwerda A. C., Pilon D., Shrekenhamer D., Landy N. I., Fan K., Zhang Z., Padilla W. J., Averitt R. D. 2008. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization. PHYSICAL REVIEW B 78, 241103.
- Thummaluru S. R., Chejarla S., Chaudhary R. K. 2019. Structural Investigation of Metamaterial Unit-cells: Development of Incident Angle Insensitive Metamaterial Absorbers.
- Tretyakov S. A., ve Maslovski S. I. 2003. Thin absorbing structure for all incidence angles based on the use of a high-impedance surface. Microw. Opt. Technol. Lett. 38, 175.
- Trung N. T., Lee D., Sung H. K., Lim S. 2016. Angle- and polarization-insensitive metamaterial absorber based on vertical and horizontal symmetric slotted sectors. Applied Optics, Vol. 55, No. 29.
- Yoo Y. J., Zheng H. Y., Kim Y. J., Rhee J. Y., Kang J. H., Kim K. W., Cheong H., Kim Y. H., Lee Y. P. 2014. Flexible and elastic metamaterial absorber for low frequency, based on small-size unit cell. Appl. Phys. Lett. 105, 041902.
- Zhu B., Wang Z. B., Yu Z. Z., Zhang Q., Zhao J. M., Feng, Y. J. Jiang T. 2009. Planar Metamaterial Microwave Absorber for all Wave Polarizations. CHIN. PHYS. LETT. Vol. 26, No. 11, 114102.
- Zhu W., Zhao Xiaopeng., Gong B. 2011. Optical metamaterial absorber based on leaf-shaped cells. Appl Phys A (2011) 102: 147–151.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kerim Gökhan

Doğum Yeri : Yüksel

Doğum Tarihi: 16.06.1985

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce, Almanca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Adem Tolunay Anadolu Lisesi (2004)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği (2016)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2016 – Eylül 2019)

Ulusal Kongre Sunum

Yüksel K. G. ve Akaoğlu B., 2016. “Yüksek verimli ve geçirgenlik özellikli metamalzeme EM enerji hasatlayıcı”. 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı.